Agriculture Canada

Research Branch

Direction générale de la recherche

The significance of acid rain to agriculture in Eastern Canada

Canada

The significance of acid rain to agriculture in Eastern Canada

D. R. COOTE
Land Resource Research Institute

D. SIMINOVITCH
Chemistry and Biology Research Institute

S. SHAH SINGH
Chemistry and Biology Research Institute

C. WANG
Land Resource Research Institute

LRRI Contribution No. 119
CBRI Contribution No. 1236

Research Branch
Agriculture Canada
1981
Reprinted 1982

Copies of this publication are available from:
D. R. Coote
Land Resource Research Institute
Research Branch
Agriculture Canada
Ottawa, Ontario
K1A 0C6

or from:
S. Shah Singh
Chemistry and Biology Research Institute
Research Branch
Agriculture Canada
Ottawa, Ontario
K1A 0C6

© Minister of Supply and Services Canada 1981
Reprinted 1982

CONTENTS

SUMMARY v

INTRODUCTION 1

SENSITIVITY OF AGRICULTURAL LAND TO LONG-TERM ACID PRECIPITATION 1

Sensitivity Classes 1

Estimation of Exchangeable Bases 2

Field Guide for Determining Soil Sensitivity Classes 2

The Soil Sensitivity Map (Map 1) 4

Acid Rain Affecting Soils 8

EFFECTS OF ACID RAIN AND RELATED GASEOUS POLLUTION ON CROP PLANTS 11

Major Atmospheric Pollutants which Affect Plants and their Mode of Action 12

i) Sulfur dioxide (SO_2) 12

ii) Nitrogen oxides (NO, NO_2), peroxyacyl nitrates (PAN) and ozone 14

Assessment of Impact and Potential for Impact of Atmospheric Pollution on Crops 15

Acid Rain Affecting Crops 16

DISCUSSION AND CONCLUSIONS 19

Agricultural Concerns Related to Acid Precipitation 21

i) Soils 21

ii) Crops 22

ACKNOWLEDGEMENTS 23

REFERENCES 24

TABLES

Table 1. Field guide for determining soil sensitivity to acid precipitation..... 3

Table 2. Area of each sensitivity class for the agricultural land in eastern Canada..... 7

Table 3. Sensitive crop types..... 16

FIGURE

Relationship between soil pH (H_2O) and percent base saturation.....3

MAPS

Map 1. Sensitivity of Agricultural Land to Long-Term Acid Precipitation and Estimated Mean Annual Atmospheric Deposition (Wet and Dry) of Soil-Affecting Acidity (1977-79), Eastern Canada..... 5

Map 2. Susceptibility of Agricultural Crops to SO_2 Pollution and Estimated Mean Annual Atmospheric Deposition (Wet and Dry) of Sulfur (1977-79), Eastern Canada..... 17

SUMMARY

Precipitation falling on agricultural land in eastern Canada is contributing acid to soils and crops. In order to assess the significance of potential problems from an agricultural point of view, soil sensitivity criteria have been developed, and evidence for plant damage has been examined.

Soils were classified into sensitive, moderately sensitive and non-sensitive classes according to the estimated degree of depletion of exchangeable bases in the plow layer resulting from 25 years of acid precipitation at input rates equivalent to the highest currently being observed in the region. About 70% of the agricultural soils of eastern Canada fall into the non-sensitive class; however, twenty-five percent of the agricultural soils of Quebec are sensitive to these criteria and in P.E.I. almost all soils are sensitive or moderately sensitive.

There is little evidence of direct damage to crops from acid rain, although indirect effects resulting from soil acidification are known. There is concern, however, for potential chronic leaf tissue deterioration resulting from gaseous sulfur dioxide (a precursor of the acidity of rain) in polluted air. Synergistic interactions with other air pollutants may also result in leaf damage from SO_2. Better crop and air monitoring data are needed in agricultural areas to assess these possible effects.

The components of acid rain which affect the acidity of soils include sulfates, nitrates and ammonium. Estimates indicate that the net soil-affecting acidity reaching agricultural land in eastern Canada from atmospheric deposition (wet and dry) ranges from about 25 to 40 kilograms per hectare per year when expressed as calcium carbonate (limestone) equivalent. This rate of acid addition is exceeded by two to ten times as a result of acidity from normal nitrogen fertilizer applications to crop land. Natural soil processes also contribute to acidification and to the need for lime additions to some soils.

Acidification will occur, even without acid rain, in soils which are sensitive and which are currently receiving nitrogen fertilizer without a regular lime application. In these soils the process may be somewhat accelerated by acid rain. In soils which are regularly and adequately limed, acid rain will have little effect. Constituents of air pollution which are not necessarily acid may be of greater long-term concern to soil quality and agriculture, but few data are available to assess their significance.

INTRODUCTION

Much of Canada's most productive agricultural land is located in the Great Lakes, St. Lawrence lowlands and Atlantic regions, and these are the areas of Canada in which there is greatest concern for the problem of acid rain. It is important, therefore, to examine the effects of acid rain on agricultural soils and crops, and to establish the nature and extent of any negative impacts of acid rain which may have occurred or which may manifest themselves in the foreseeable future.

This report presents the results of the preliminary assessment by Agriculture Canada of the effects of acid rain on agriculture in eastern Canada. The report discusses the problem under four main topics: the sensitivity of soils to acidification and changes in base status as a result of acid rain; the estimation of the distribution of current quantities of acid rain affecting soils; the effect of acid rain and related gaseous pollution on crop plants; and the significance of the problem to agriculture.

SENSITIVITY OF AGRICULTURAL LAND TO LONG-TERM ACID PRECIPITATION

Data available on soil characteristics relating to exchangeable bases, and assumptions based on the current state of knowledge of soil science, were used to develop a practical method of assessing soil sensitivity to acid precipitation (Wang and Coote 1981). The method uses soil pH in water and soil texture to estimate the exchangeable bases in a soil. The estimate is used to classify the sensitivity of the soil to acid precipitation.

Sensitivity Classes

Exchangeable bases in a soil reflect the soil's capacity to neutralize the acid added by precipitation. The more exchangeable bases available, the greater will be the neutralization capacity of the soil, and the less will be the influence of acid precipitation on soil pH.

In Canadian soils the plow layer is about 15 cm in thickness. If it is assumed that the bulk density of the plow layer is 1.3 g/cm^3, and that 60 kg/ha per year of $CaCO_3$ equivalent is the maximum acid input (from rainfall chemistry data and dry deposition estimates), in 25 years a given soil in eastern Canada could receive a maximum of 1.5 milli-equivalents (meq) of acid from the atmosphere per 100 g of soil. Assuming the loss of 10 to 25% of the exchangeable bases in the plow layer is significant (McFee 1980), three soil sensitivity classes to acid precipitation can be defined:

1. Sensitive - soil exchangeable bases are less than 6 meq/100 g soil (or more than 25% of exchangeable bases could be depleted in 25 years).

2. Moderately Sensitive - soil exchangeable bases are 6 to 15 meq/100 g soil (or 10 to 25% of exchangeable bases could be depleted in 25 years).

3. Nonsensitive - soil exchangeable bases exceed 15 meq/100 g soil (or less than 10% of exchangeable bases could be depleted in 25 years).

Estimation of Exchangeable Bases

In calcareous surface soil it can be assumed that the buffering capacity is greater than 15 meq/100 g and the soil can be considered non-sensitive to acid precipitation.

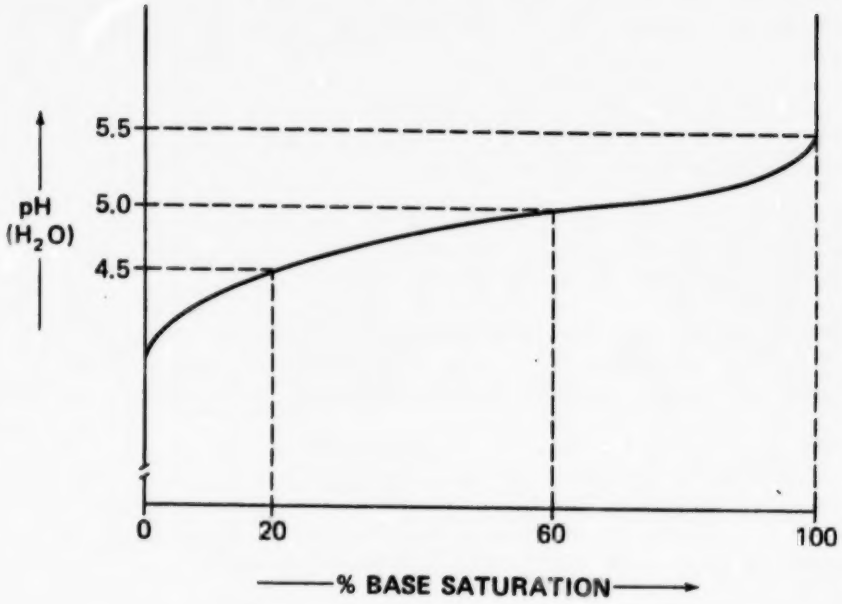
In noncalcareous surface soil (soil without free carbonates), exchangeable bases are mainly controlled by CEC and soil reaction (pH). The CEC in turn is determined mainly by the amount and type of clay and by the soil organic matter. There is also an interaction between CEC and pH in any given soil, complicating the prediction of exchangeable bases in noncalcareous soils. Nevertheless, the following assumptions were made in order to permit an estimation of the base status of soils for the purpose of establishing sensitivity classes.

1) Types of clay minerals in surface soils of Eastern Canada are similar.
2) The variation of average organic matter content in surface soils, if considered over large blocks of land, is relatively narrow in most of the cultivated land in Eastern Canada.

With these two assumptions, the variables used in estimating exchangeable bases are soil texture (mainly clay content) and soil pH. Soil texture is used to estimate CEC and soil pH is used to estimate percent of base saturation. The product of CEC multiplied by the percent base saturation provides a measure of the exchangeable bases in the soil.

Field Guide For Determining Soil Sensitivity Classes

For the majority of cultivated surface soils, the permanent charge CEC for various texture classes is: clayey, 25-40 meq/100 g; loamy, 10-25 meq/100 g; and sandy, 2-10 meq/100 g. Combining this information with the general relationship between soil pH and percent base saturation (see Figure) provides a field guide for assessing approximate soil sensitivity to acid precipitation (Table 1).



Relationship between soil pH (H_2O) and percent base saturation.

Table 1. Field guide for determining soil sensitivity to acid precipitation

Sensitivity class	Soil characteristics*
Nonsensitive	All calcareous soils Clayey pH >5.0 Loamy pH >5.5
Moderately sensitive	Sandy pH >5.5 Clayey pH 4.5-5.0 Loamy pH 5.0-5.5
Sensitive	Clayey pH <4.5 Loamy pH <5.0 Sandy pH <5.5

* Plowed layer (about 15 cm in thickness). Also assume liming is not part of regular soil management practice. Soil pH is measured in water.

The Soil Sensitivity Map (Map 1)

Information for the compilation of the map of soil sensitivity to long-term acid precipitation (Map 1) was obtained from the following sources:

1) Canadian Soil Information System (CanSIS)
2) Published soil survey reports and interim reports
3) Provincial soil testing laboratories

With the information on texture and pH of the surface layer of each map delineation, sensitivity classes were assigned to each according to the guidelines in Table 1.

General information from the soil sensitivity map is summarized in Table 2. With the exception of Prince Edward Island, much of the agricultural land in eastern Canada is nonsensitive to acid precipitation.

Soil management practices were not considered in the preparation of the map. In properly managed farmland, farmers periodically apply lime as necessary to maintain the desired soil pH. In such instances, the amount of acid received from acid precipitation will usually be very small compared to the amount of lime normally used.

Sandy soils, such as those often used for blueberry, strawberry, tobacco and potato crops, can be sensitive to acid precipitation due to their relatively low acid buffer capacity and low pH. Consequently, good management of sandy soils is required. Organic soils in eastern Canada tend to be acid. While organic soil material has a high exchange capacity per unit weight, the low average bulk density of organic soils (about 10% of that of average mineral soils) results in these soils being relatively low in exchangeable bases. They are therefore considered to be generally sensitive or moderately sensitive to long-term acid precipitation.

Nitrogen fertilizer applications frequently contribute acidity to soils (Penney and Henry 1976), at rates which can be as much as ten times that from acid precipitation. Therefore, acidity development in sensitive soils is more likely if high rates of nitrogen fertilizer are applied. For example, most of the potato land of P.E.I. is on noncalcareous sandy soils and high rates of nitrogen fertilizer are used. It is essential to use the proper amount of lime in these sandy soils to maintain the desired level of pH. Otherwise, such soils will be depleted of exchangeable bases, and their productivity will be reduced due to lack of available nutrients.

Acidity development in soils also occurs naturally as a result of carbonic acid produced by the roots of plants, organic acids from the decomposition of organic matter in the soil, and nitrate production in cultivated agricultural land (Bache 1979).

Sensitive - Surface soil exchangeable bases are less than 6 meq/100 g soil (or more than 25% of exchangeable bases could be depleted in 25 years).

Moderately sensitive - Surface soil exchangeable bases are 6 - 15 meq/100 g soil (or 10 - 25% of exchangeable bases could be depleted in 25 years).

Non sensitive - Surface soil exchangeable bases exceed 15 meq/100 g soil (or less than 10% of exchangeable bases could be depleted in 25 years).

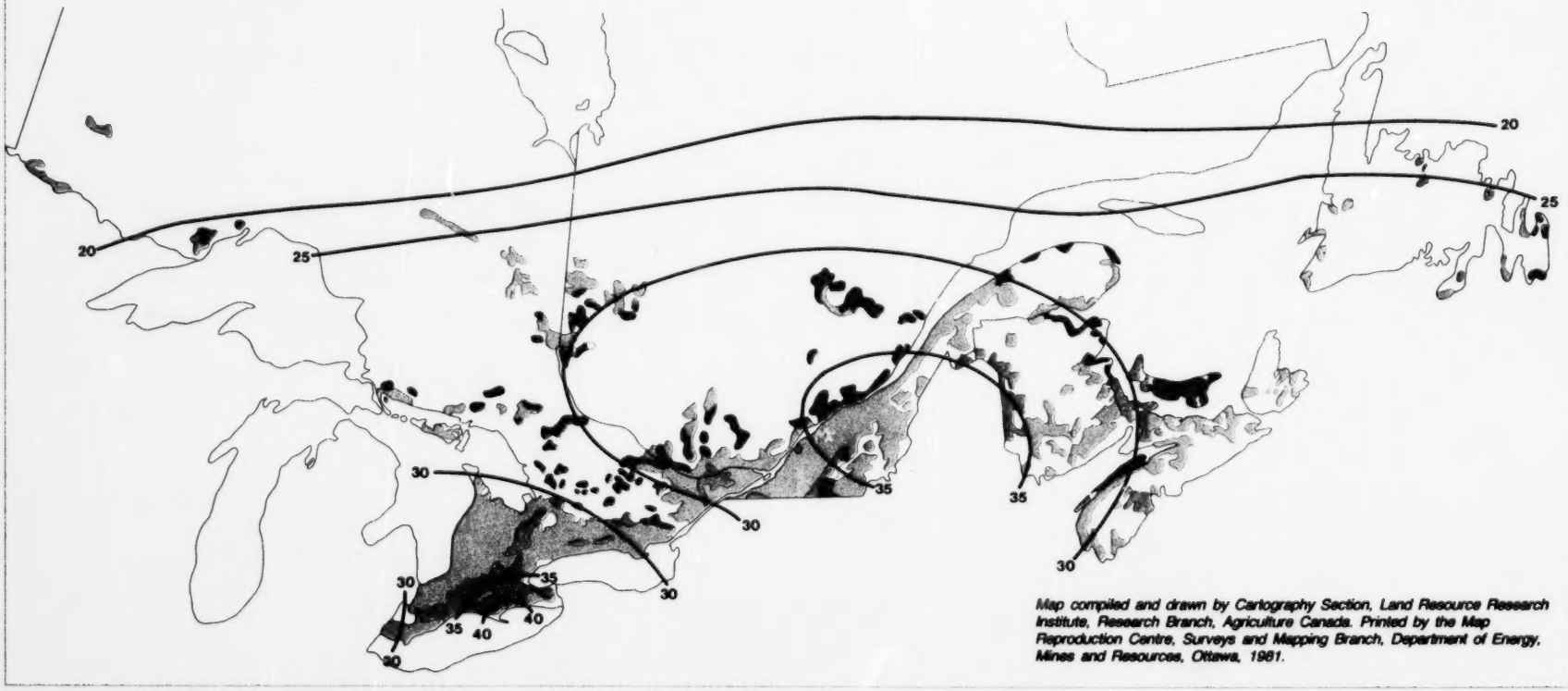
Unclassified - Non agricultural land.

MAP 1. SENSITIVITY OF AGRICULTURAL LAND† TO LONG-TERM ACID PRECIPITATION AND ESTIMATED MEAN ANNUAL ATMOSPHERIC DEPOSITION (WET AND DRY) OF SOIL-AFFECTING ACIDITY (1977-79)* EASTERN CANADA

†Note: Due to cartographic generalization, areas shown as agricultural land may include non agricultural land.

*From CANSAP Data, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario. Including 40% Dry deposition estimate, in ueq. (100 gm. soil)$^{-1}$ yr^{-1}. Calculated and Interpolated by D. R. Coote, Land Resource Research Institute, Agriculture Canada, Ottawa.

Soil information compiled by C. Wang, Land Resource Research Institute, Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa. The cultivated land areas shown were generalized from data at scale 1:50,000 by Claire Gosson, Geographical Services Directorate, Survey and Mapping Branch, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa.



Map compiled and drawn by Cartography Section, Land Resource Research Institute, Research Branch, Agriculture Canada. Printed by the Map Reproduction Centre, Surveys and Mapping Branch, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1981.

TABLE 2. Area of each sensitivity class for the agricultural land in Eastern Canada

	Total agricultural land*	Sensitive area		Moderately sensitive area		Nonsensitive area	
	hectares	hectares	%	hectares	%	hectares	%
Newfoundland	29 423	4 660	15.8	5 885	20.0	18 878	64.2
Nova Scotia	400 249	16 290	4.1	72 008	18.0	311 951	77.9
Prince Edward Island	278 050	215 443	77.5	62 607	22.5	None	0
New Brunswick	402 328	38 652	9.6	136 724	34.0	226 952	56.4
Quebec	3 654 134	916 666	25.1	125 313	3.4	2 612 155	71.5
Ontario	5 966 816	561 728	9.4	1 012 734	17.0	4 392 354	73.6
Eastern Canada	10 731 000	1 753 439	16.3	1 415 271	13.2	7 562 290	70.5

*Improved farmland in 1976 agriculture census.

At the scale of Map 1, general information is provided only for relatively large land areas. It should not be used at the individual farm level. For smaller sections of land or for individual farms, soil sensitivity classes to acid precipitation can be estimated according to the guidelines in Table 1, following hand texturing of the soil and measurement of soil pH (in H_2O).

Acid Rain Affecting Soils

Estimating the acidity of rainfall and dry atmospheric deposition (generally considered together as "acid rain") as it affects the soil poses a number of difficulties. Acidity-causing atmospheric pollution in Canada has been characterized in terms of sulfur (or sulfate or sulfur dioxide) transport (Rennie 1979; Whelpdale and Galloway 1979). Indeed, most estimates of acidifying substances transported by the atmosphere have concentrated on these compounds, although there are a number of other sulfur and nitrogen compounds which will influence the acidity of rainfall and dry deposition (Grennfelt et al 1978; Fowler 1978). Whelpdale (1977) has also calculated H^+-ion loadings to receiving land and water ecosystems from pH measurements.

Using either sulfur or H^+-ion loadings in precipitation can be misleading when an estimate of the impact of "acid rain" on the soil is attempted. When sulfur alone is used, then the neutrality of calcium, magnesium, sodium and other such salts of sulfur is ignored. The acidic effects of nitrate and the acidity released by the nitrification of ammonium in the soil are also omitted. The simplified reaction for the latter source of acidity is as follows (Penney and Henry 1976):

$$NH_4^+ + 2O_2 \xrightarrow[\text{(bacteria)}]{\text{nitrification}} NO_3^- + H_2O + 2H^+ \qquad (1)$$

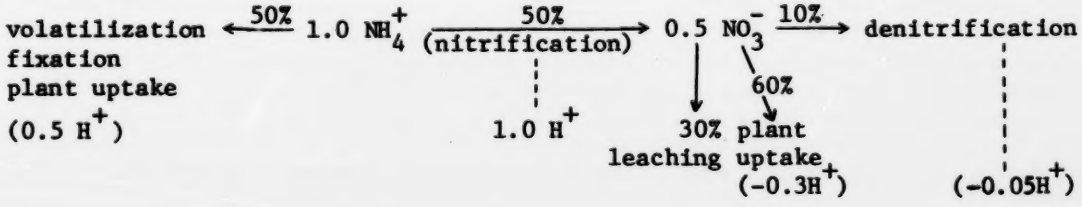
If H^+-ion load in precipitation is used, the net effect of the equilibria between H^+ and other ions in solution will take account of neutral salts and nitrate, but the soil acidity associated with ammonium is still ignored.

The H^+-ion load, as measured by the pH of precipitation, seems preferable to the sulfur load if ammonium concentration data are also available to allow consideration of acidity from this source as well. Simply adding the ammonium to the H^+ load is not sufficient, however, to adjust for its acidifying effect because each NH_4^+ ion generates $2H^+$ ions on nitrification (see eqn. 1). Neither can twice this quantity be used as some ammonium is likely to be taken up directly by plant roots, though nitrate is usually taken up preferentially. When NH_4^+ is absorbed by plant roots an equivalent amount of H^+ is released by the root to maintain ionic equilibrium (Russell 1961). Similar mechanisms apply to nitrate taken up by roots or denitrified. These processes are neutralizing, however, as they result in the release of bicarbonate ions in root exudates, and OH^- ions, respectively (Ibid.). Nitrate is readily leached from the soil, denitrified or taken up by plant roots which would tend to encourage further nitrification and favour the acidifying process. However, when NO_3^- from nitrification or in precipitation is taken up or denitrified, the neutralizing effect must also be considered.

Some NH_4^+ is fixed by clay minerals and organic matter, which tends to reduce the cation exchange capacity, which in turn reduces soil buffering capacity. Ammonium may also dissociate to NH_3, to be volatilized or fixed by organic matter, and this also tends to be an acidifying process.

To make an estimate of the contribution of atmospheric NH_4^+ and NO_3^- to soil acidity it is necessary to make some assumptions about the extent of nitrification, denitrification and leaching. Measured values for these variables cover wide ranges. For example, Russell (1961) reported nitrification rates of 2 to 60 percent of added N, dependent on soil moisture, temperature, pH and oxygen levels; leaching losses were reported ranging from 2 to 31 percent of added N; and combined leaching and gaseous losses were reported as 0 to 69 percent. Brady (1974) presented data indicating that under ideal moisture and temperature conditions nitrification of applied NH_4^+ can be essentially 100 percent. Cameron et al (1977) estimated average combined leaching and denitrification losses at 0 to 48 percent of total N sources in three southern Ontario soils.

If, for purposes of generalization, it is assumed from the above data that 50 percent of nitrogen added to the soil as ammonium is nitrified, and of this quantity 30% is leached and 10% is lost by denitrification, then the net effect of these processes will be that the soil derives about 1.15 H^+ ions for each NH_4^+ ion delivered in precipitation. The following schematic equation illustrates the deriviation of this net value:



$$\text{Net } H^+ = 0.5 + 1.0 - 0.3 - 0.05 = 1.15$$

Using the same assumptions, about 70% of the nitrate direct from precipitation will be taken up or denitrified, with the release of 0.7 neutralizing equivalents per equivalent of nitrate. This quantity must therefore be subtracted from the H^+-ion load calculated from pH and ammonium levels. The procedure outlined above avoids the use of sulfur when estimating soil-affecting atmospheric acidity, and has been used in this report.

The problem of acidity from dry deposition introduces the greatest uncertainty into the estimation of the net input of atmospheric acidity, primarily because it is difficult to measure. Dry deposition of sulfur in eastern Canada has been calculated to be about 40 percent of the wet deposition based on air concentrations and deposition velocities (Whelpdale and Galloway 1979). This estimated percentage is lower than that for the eastern U.S. (Ibid.), but about the same as that for southern Norway (Overrein 1977). Nyborg and Walker (1977) indicated that

in summer in central Alberta, more sulfur was deposited in the dry particulate form than in rain, but that these particulates tended to be neutral salts. However, sorption of sulfur dioxide by soils occurred readily; and oxidation to sulfate was rapid, resulting in soil acidification. Direct sorption of ammonium and gas-phase nitric acid no doubt has similar effects after nitrification, but at present these are even more difficult to measure than sulfur dioxide dry deposition. Furthermore, the soil itself is a source of volatilized NH_3 and nitrogen oxides.

In order to arrive at a reasonable estimate of the acidity arising from dry deposition, it is necessary to make further assumptions: Fowler (1978) has reported that the dry deposition rates of both gaseous and particulate nitrogen oxides should be at least as great as those of sulfur dioxide. Thus it is reasonable to assume that the approximate eastern Canada dry deposition rate of 40 percent of wet deposition for sulfur can also be applied to the "net H^+-ion" loading calculated for all forms of sulfur and nitrogen in wet deposition. This also accounts for neutral salts of sulfur because it is based on H^+, NO_3^- and NH_4^+ ions rather than simply on the sulfur content of precipitation.

Precipitation chemistry (pH, conductivity and 8 major ions) data have been collected monthly at 50 locations in Canada since 1977 by the Atmospheric Environment Service CANSAP program (Berry 1979). They have been used to prepare the estimate of wet and dry atmospheric deposition for eastern Canada shown on Map 1. The data have been processed according to the assumptions discussed above. The "net H^+ -ion" concentration values were corrected (C_s) for differences between sampler catch and monthly total precipitation, following an A.E.S. procedure (personal communication, D. Whelpdale, A.E.S., Downsview, Ont.) as follows:

$$C_s = (\{H^+\} + 1.15\ \{NH_4^+\} - 0.7\ \{NO_3^-\})\ (1 + P_c/P_s)/2 \qquad (2)$$

where: $\{H^+\}$, $\{NO_3^-\}$ and $\{NH_4^+\}$ are the measured concentrations of hydrogen, nitrate and ammonium ions, respectively, in monthly accumulated precipitation samples in moles/litre; and P_c and P_s are the quantity of monthly accumulated precipitation in millimetres in the sampler and in an adjacent standard rain gauge, respectively. This correction assumes that poor catch (aerodynamic influence and sensitivity of sampler activation control) and evaporation are equally responsible for P_c usually being less than P_s.

Annual deposition (D_a, in moles x 10^4/ha) was then found as follows:

$$D_a = 1.4\ \left(\sum_{s=1}^{n} C_s \cdot P_s\right) P_a / \sum_{s=1}^{n} P_s \qquad (3)$$

where P_a = annual total precipitation from standard rain gauge (including snow estimates) in millimetres and n = number of months sampled. The results were then expressed as milli-equivalents of H^+ per 100 g of plow-layer soil (assuming the average plow layer is 15 cm thick and has a bulk density of 1.3 g/cm^3). Data were available for 1977, 1978 and 1979. The resulting acidity has been plotted and the distribution is presented on Map 1.

This distribution clearly shows the influence of the westerly prevailing winds transporting atmospheric acidity from the industrial areas of the Central U.S. and Ontario across southern Ontario into the St. Lawrence Valley, where additional acidity is derived from the industry of this area and southern Quebec. As the air mass moves further east, deposition and dispersion lead to progressively lower inputs of acidity to the soil.

Another process which should be considered is the loss of precipitation by direct runoff of rainfall and snowmelt over the soil to streams with little opportunity for soil acidification. In Eastern Canada, stream flow varies from about 25 percent of precipitation in southwestern Ontario to about 75 percent in Nova Scotia (Fisheries and Environment Canada 1978). Of this streamflow, estimates in southern Ontario indicate that about 55-70 percent occurs as overland runoff (Whitely and Ghate 1978), which is similar to that indicated by summer data for Nova Scotia (Pender and Jones 1969). The runoff component in spring is likely to be higher. Thus the average percentage of atmospheric acidity which never enters the soil may vary from as low as 14 percent in southwestern Ontario to about 50 percent in Nova Scotia. While this factor cannot be used to estimate acidifying atmospheric inputs to a specific soil area without knowledge of the runoff characteristics of that area, it does indicate that the average inputs will be less than those estimated from precipitation chemistry (Map 1), especially in the Atlantic Provinces.

EFFECTS OF ACID RAIN AND RELATED GASEOUS POLLUTION ON CROP PLANTS

"Acid Rain" has become a popular term which frequently covers a wide range of air pollution components which are not necessarily either acid in reaction or dissolved in rain. Since the long-range transport of atmospheric pollutants (LRTAP) is usually considered in conjunction with acid rain, it is discussed here in terms of those components which affect crop plants.

Emissions from industrial, energy-generating and urban activities continue to present a threat to the quality of our environment and to our forest and agricultural resources. A high proportion of the damage done by atmospheric pollution derives from acid generated in rain by gaseous pollutants such as SO_2. While evidence exists of destruction of life in lakes and of damage to forests in Canada due to this pollution, no hard evidence exists of damage on any appreciable scale to the yield of agricultural crops.

Experiments have been conducted on a laboratory scale in efforts to simulate the effects of acidity in rain on crop plants (Lee et al 1980), but corresponding effects in the field have not been well documented (Neumann 1980). On the other hand, injury to crop plants by gaseous SO_2 in the laboratory has been duplicated under field conditions in places where atmospheric pollution by SO_2 is present in similar concentrations (Katz and Ledingham 1939). Damage to crop plants and diminished yield must be anticipated in all areas where gaseous SO_2 pollution is present and increasing. The assessment of the effects of acidity per se in rain is more difficult but must be weighed not only in terms of direct effects on foliage but also as long-term effects due to increases in the acidity of soils resulting from this fallout.

This section addresses the problem of the damaging effects of acid rain and related atmospheric pollutants on plants and ultimately on crop yields. It also considers factors required for assessing the significance of present and future impacts on crop yields.

Major Atmospheric Pollutants which Affect Plants and their Mode of Action

i) Sulfur dioxide (SO_2)

Historically SO_2 was the first atmospheric pollutant to be recognized as an important toxic agent to plants, and the classic studies by Katz and Ledingham (1939) were among the first comprehensive studies of SO_2-derived plant injury. A quotation from Taylor (1979) reads: "On a world-wide basis SO_2 is probably more responsible for vegetation injury and overall economic loss than any other air pollutant". The most common source of SO_2 in the atmosphere is the combustion of fossil fuels. The effects of SO_2 pollution on plants are both direct and indirect.

Direct effects: Plants and plant cells are very permeable to gases. Gaseous SO_2 can injure the plant directly by entering open stomata and then being absorbed directly as a gas into the inner cells of the leaf. Conditions which limit stomatal opening also reduce SO_2 injury. The cuticle of leaves constitutes a barrier and plants which have no cuticle like mosses or algae are very susceptible to SO_2 and can therefore be used as effective biological test objects (Mudd and Kozlowski 1975).

Once inside plant cells, SO_2 can undergo a number of transformations. The major toxicity derives from conversion to sulfites which, due to their extreme reactivity, directly interact or interfere with the photosynthetic metabolic intermediates or processes in reactions involving free radicals or superoxides. The exact nature and sequence of these reactions has not been completely resolved. Injury to the plant results, with lesions involving chloroplast damage and impairment of photosynthesis (Ibid.). Alternatively, after absorption as a gas, oxidation of SO_2 in the leaf cells is followed by solution and hydration to H_2SO_4. The SO_4 ion can then enter normally into many

essential plant reactions and constituents because sulfur is an essential element in plants. However, in the event of excess absorption and after the buffering capacity of the plant has been exhausted, plant injury due to direct acidity within the plant ensues. This results in impairment of vital processes. In either case it is the gaseous SO_2 and its entry through stomata which is the initial and important step in the sequence of reactions which lead to the major injury, and not the direct fallout and wetting of the surface of leaves by acid rain formed in the atmosphere.

Critical discussions of direct injury of plants by SO_2 deal almost exclusively with the gaseous component and its effects after entry through the stomata and uptake by the interior mesophyll cell (Ibid.; Nriagu 1978). This leads to the impairment of photosynthesis and damage to chloroplasts and cells. Generally, the symptoms are lesions and discoloration of the leaves with inevitable reduction in crop yields. The effects can be immediate (acute injury due to the sulfite) or chronic (due to cumulative absorption of SO_4 beyond threshhold buffering capacity) (Linzon 1978). The extent of SO_2 absorption is evidenced by estimates (Bennett and Hill 1975) indicating that a continuous cover of assimilating alfalfa can remove 88 kg of SO_2 per square kilometer per day from the atmosphere with a mean concentration of SO_2 similar to that over a 5000 square kilometer area in the vicinity of Sudbury. Total absorption would be greater in perennials like trees or alfalfa than in annuals and less in cropped plants than in trees or shrubs.

Rennie and Halstead (1977) reviewed 23 references reporting threshold and/or tolerable concentrations of SO_2 in the atmosphere. The reported levels appeared to decrease with time, with the more recent references (1971-1972) reporting the lowest concentrations. These were about 0.05 ppm (about 180 $\mu g\ m^{-3}$) for agricultural crops and even lower for some tree species. While these levels are considerably higher than have been found in preliminary monitoring of gaseous SO_2 levels in remote rural areas of eastern Canada, they are only marginally higher than those often observed in Toronto (Barrie, L.A., Wiebe, H.A., Fellin, P., Anlauf, K., AES, Downsview, Ont., unpublished data, 1980). Thus the potential for damage from SO_2 near urban areas and other sources is evident.

Long-range transport of SO_2 has also been demonstrated (Barrie *et al* 1980; McBean 1980). With the deficiencies in rural monitoring data from areas such as southern Ontario and southern Quebec, and the probability of synergistic effects of SO_2 with other air pollutants, it is therefore reasonable to reserve judgement on SO_2 impacts on the yields of agricultural crops until more data are available.

Many laboratory studies have attempted to demonstrate direct injury to leaves by simulation of acid rainfall. In the laboratory prolonged exposures of foliage to pH's more acid than those of rainfall are needed to elicit any clear symptoms of damage (Lee *et al* 1980; Neumann 1980). The results are inconclusive at common pH's of natural rainfall (Neumann 1980; Evans and Curry 1979).

Indirect effects: The indirect effects of SO_2 on plants are of equal and possibly greater importance on a long-term basis than the direct effects. They are drawing increased attention because of their protracted and persistent features. Linzon (1978) has noted that the effect of acid precipitation is on soils rather than on foliage. The injurious consequences of increases in acidity of the soil are varied. There are strict limits to the growth of plants at acid pH's. Soils or solutions with pH values less than 4.0 are directly toxic to plant roots. Minimum pH values for good growth of crops (Nyborg 1975) range from 6.2 for alfalfa to pH 4.6 to 5.0 for grasses, with the values for most crops being above pH 5.0. Since rain water in eastern Canada is often in the pH range of 4.0 to 5.0, it follows that without adequate buffering properties in soils there exists a real possibility of injury. High soil acidity affects the total chemistry of soils and consequently influences the growth of plants in a number of ways. Depending on the species, plants may suffer from toxic levels of Al and Mn due to increases in their solubility in acid soils. Nyborg (1975) emphasizes that, due to a considerable increase in solubility, Al can become toxic at pH 5.5. Symbiotic nitrogen fixation is also sensitive to pH (personal communication, S. Mathur, CBRI, Agriculture Canada), since both nodulation and nitrogen fixation are retarded by low pH. In general, acid pH's are detrimental to microbiological processes in the soil.

While it is clear direct gaseous SO_2 absorption from the atmosphere presents a concern for agricultural crops, it is also becoming increasingly evident that cumulative acidity in the soil from acid rain and other sources such as fertilizers will probably have a greater influence. In terms of remedial or corrective measures, however, hope is offered for limitation of acid rain impacts through changing agricultural practices including selecting by breeding for more acid soil tolerant plants, shifting cropping programs to better suit sensitive areas and more directly through liming.

ii) Nitrogen oxides (NO, NO_2), peroxyacyl nitrates (PAN) and ozone

The nitrogen oxides and their derivative toxicants produced photochemically, and by industrial and combustion processes, represent another category of pollutants in the atmosphere. To some extent the concerns with SO_2 apply also to nitrogen oxides. However, as far as gaseous injury by nitrogen oxides is concerned the effect on plants is not the same as SO_2 and plants will not exhibit the same sensitivity to nitrogen oxides as they do to SO_2. Indeed Taylor (1979) states that nitrogen oxides have a low level of phytotoxicity. On the other hand, nitric oxide produced in combustion can be oxidized in the atmosphere to nitrogen dioxide, which can react photochemically with hydrocarbons to produce ozone and peroxyacyl nitrate (PAN). Ozone and PAN are destructive to vegetation in the presence of hydrocarbon pollution. Damage by ozone (flecking) in certain regions is now well documented but evidence of widespread local occurrences, by contrast with effects of SO_2, has not been well established.

Assessment of Impact and Potential for Impact of Atmospheric Pollution on Crops

There are two necessary approaches to the problem of pollution damage to crop plants in Canada. One is the assessment of the present and potential future damage to crop plants and the other is the possible remedial or corrective measures which might be taken to ameliorate or avoid such damage. Corrective or remedial measures, other than those of control at the source of emissions, will depend on the results of the damage assessment.

In respect to damage to crop plants, the major category is the direct damage incurred from penetration of the plant tissues by gaseous sulfur dioxide, nitrogen oxides and probably ozone. Based on the available evidence, the direct effect of acid fallout on foliage surfaces need not be a source of great concern for the moment. The results of simulated acid fallout on foliage in laboratory experiments do not appear to be conclusive, and pH values of rainfall seldom fall to those at which negative effects on plants have been observed (AES 1977-79; Lee et al 1980). Indirect effects resulting from cumulative acidification of the soil environment may well override the injuries inflicted either by wet or dry fallout on the surfaces of plants (Neumann 1980). The effects of ozone gas generated by photochemical interaction of nitrogen oxides with hydrocarbons should not be ignored but, at the present time, emphasis must be on the effects of SO_2 and nitrogen oxides as gases and on their contribution to acidification of rain water.

The following information will be needed for a complete assessment of air pollution effects on agricultural crops:

a) Routine gathering of data on intensity and scope of pollution by regular monitoring or sampling of the atmosphere in rural regions exposed to the paths of emissions from active centres of industrial or combustion activities. This monitoring should encompass direct analysis for gaseous SO_2 and nitrogen oxides in the atmosphere and measurements of rates of assimilation by plants (deposition velocities) at different physiological stages.[1]

b) Statistical data on distribution and intensity of cultivation of important crops. Knowledge of the relative sensitivity of these crop plants to gaseous SO_2 can then be used to calculate a weighted estimate of the degree of possible impact on the agricultural economy of air pollution. Malvern, Paterson and Grey (1980) have made an initial attempt at this task for Ontario. They used the term "sensitivity crop index" for the weighted value which they arrived at from such calculations. They suggest that if it is possible to superimpose data on the distribution of SO_2 pollution for Ontario on the map of sensitivity crop index, an estimate of the pollution risks in Ontario can be obtained. Table 3 shows some relative crop sensitivity estimates based on the table prepared by Malvern et al (Ibid.).

---

[1] Agriculture Canada and the Province of Alberta have initiated some cooperative studies of these factors (personal communication, R.L. Desjardins, LRRI, Agriculture Canada, Ottawa).

Map 2 has been prepared to show the distribution of sensitive crops, weighted by factors reflecting the crop values and the degree of specialization of soil and climate needs of each crop type (Table 3). The map presents the distribution of each of the crop types listed in Table 3, in percent of farmland multiplied by the appropriate factor. This serves to emphasize those crops which are most valuable and/or have the most specific soil and climate needs, making it more difficult to relocate production if atmospheric pollution damage becomes excessive. While it is desirable to plot rural gaseous SO_2 concentrations on this map, these data are not presently available. Instead, estimates of the total sulfur deposition have been plotted, but only to give a gross indication of areas most likely to be influenced by SO_2, and not as an estimate of SO_2 *per se*.

c) Data are available to reflect the effect of acid rain on the *soil* which in turn will affect the viability and growth of the crop plants. The sensitivity of the soils in various regions of eastern Canada to changes in pH due to acidity in rain fallout has been compiled and presented on Map 1, along with an estimate of soil-affecting acidity from precipitation.

Table 3. Sensitive crop types*

Crop group	Assigned rating value
Fruit and vegetables	4
White beans	3
Soyabeans	2
Grains and alfalfa	1

* After Malvern *et al* (1980); Rating is based on economic value and degree of specialization of soil and climate needs with respect to each crop type, with tobacco and sweet corn excluded as they are sensitive only to ozone.

Acid Rain Affecting Crops

Data for maintaining an up-to-date assessment of SO_2 levels in the atmosphere are sparse. There are many sources of atmospheric sulfur which contribute to sulfur in acid rain (Fowler 1978). It has also been shown that there is a correlation between atmospheric SO_2 and dissolved SO_2, HSO_3^- and $SO_3^=$ in rain water (Gravenhorst *et al* 1978), but it is not clear whether there is a reliable relationship with SO_4 or total S in rain water. Thus precipitation SO_4 cannot be used as a surrogate for gaseous SO_2. Nevertheless, some studies have related precipitation SO_4 to atmospheric SO_2 emmissions (Malvern *et al* 1980; Acres Consultants 1977), and others have demonstrated that atmospheric SO_2 can be related to distant as well as local sources (McBean 1980; Barrie *et al* 1980). It is therefore reasonable to expect that areas

MAP 2. SUSCEPTIBILITY OF AGRICULTURAL CROPS TO SO_2 POLLUTION† AND ESTIMATED MEAN ANNUAL ATMOSPHERIC DEPOSITION (WET AND DRY) OF SULFUR (1977-79)* EASTERN CANADA

*Wet sulfur deposition ($gSm^{-2}\ yr^{-1}$) calculated from CANSAP data, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, 1977-79. Dry deposition estimated at 40% of wet deposition.

The cultivated land areas shown were generalized from data at scale 1:50,000 by Claire Gosson, Geographical Services Directorate, Survey and Mapping Branch, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa.

* Note: Due to cartographic generalization, areas shown as agricultural land may include non agricultural land.

High susceptibility (dimensionless index, ≥0.60)

Moderate susceptibility (dimensionless index, 0.40-0.59)

Low susceptibility (dimensionless index, 0.20-0.39)

Very low susceptibility (dimensionless index, <0.20)

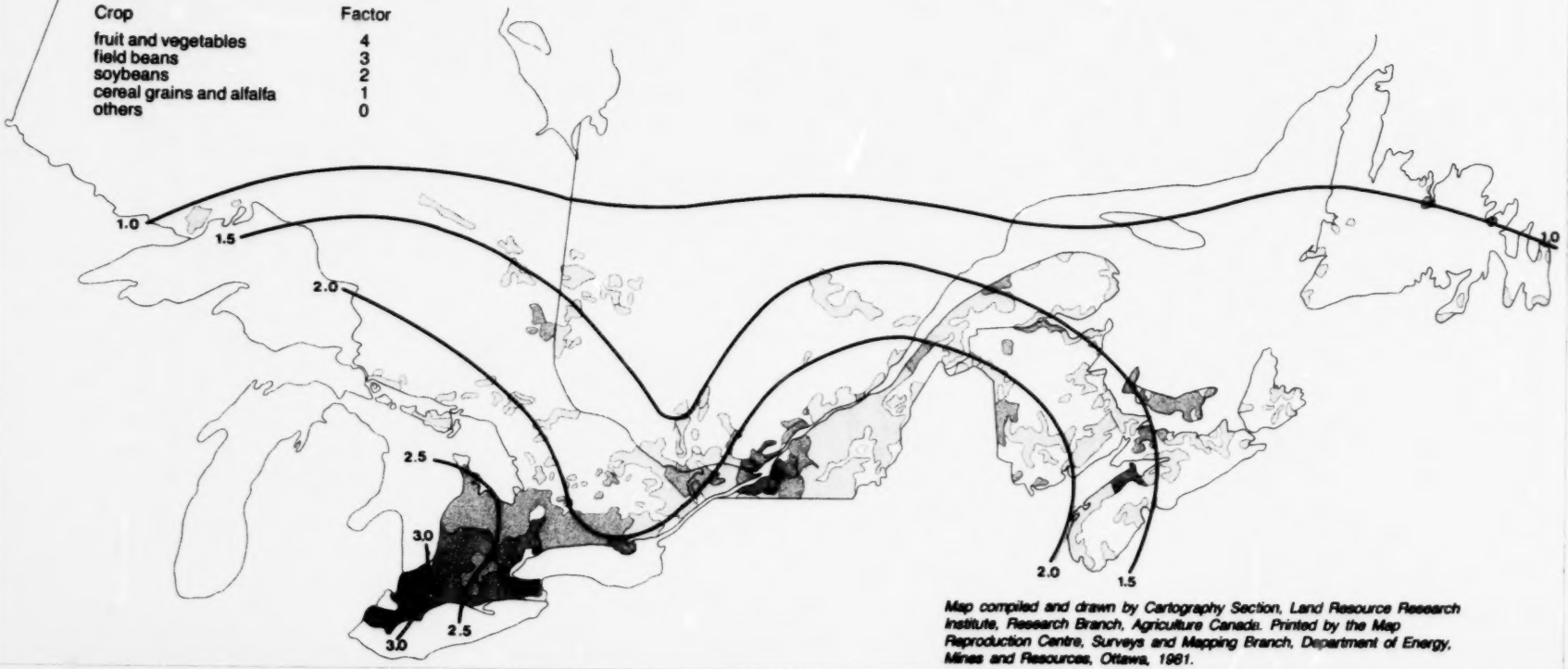
Non-agricultural

†Susceptibility of crops estimated at the county level from:

$$\text{Index} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\text{area of crop } i}{\text{area of farmland}} \times \text{Sensitivity factor } i \right)$$

where areas are from Statistics Canada, Census of Agriculture, 1976, and sensitivity factors (from table 3 and Malvern, Paterson and Grey, 1980) are:

Crop	Factor
fruit and vegetables	4
field beans	3
soybeans	2
cereal grains and alfalfa	1
others	0



Map compiled and drawn by Cartography Section, Land Resource Research Institute, Research Branch, Agriculture Canada. Printed by the Map Reproduction Centre, Surveys and Mapping Branch, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1981.

with high total sulfur levels in atmospheric deposition will be more likely to have higher gaseous SO_2 levels than those with lower total S deposition. Indeed, comparison of the unpublished data of Barrie, Wiebe, Fellin and Anlauf (AES, Downsview, Ont., 1980) with CANSAP sulfate levels indicate relative agreement when the urban data from Toronto are excluded. In the absence of further data, CANSAP sulfur data do appear to give some indication of areas in which plants may be subjected to air pollution. The sulfur content of rainfall samples collected in the CANSAP program is given only as SO_4, and since other data on dry deposition in eastern Canada are not available, it is necessary to use these data as interim indicators of total sulfur fallout. By using the 40% dry deposition estimate extracted from Whelpdale and Galloway (1979), an initial evaluation of the distribution of total sulfur deposition over agricultural land can be made from the CANSAP data base. This distribution is presented on Map 2, but it cannot be used quantitatively.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

It is reasonable to assume that as long as precipitation has fallen on the surface of the earth, it has been somewhat acidic in nature. The intensity of this acidity has depended on the presence of various elements in the atmosphere. Under ideal conditions which occur only under relatively few circumstances, the pH of rain should be about 5.6. This is based on the mean concentration of CO_2 in the atmosphere. The other major components of the atmospheric air, namely N_2 and O_2, do not react readily with rain water except under special circumstances, where N_2 is converted to oxides of N.

The situation described above has rarely existed since the appearance of man on this earth. Since the industrial revolution the emission of contaminants into the atmosphere has been increasing steadily and interfering more and more with the natural environment. Nitrogen and sulfur are two such elements which are discharged into the atmosphere in a variety of different chemical forms and are of particular concern in increasing the acidity of rain. The emissions of pollutants return to earth as dry deposition or combined with rain water. Acidity in precipitation results from the presence of acids, mainly H_2SO_4 but also HNO_3 and HCl. Ammonium ions (NH_4^+) are also transformed by nitrification into HNO_3.

The presence of acidity in rain water has become an international concern because of damage to the environment both near and distant from the sources of these pollutants. A good example is Sweden, where 77 percent of the atmospheric S has its source outside the country. Similarly, pollutants from the industrial area of the central USA, Ontario and Quebec are carried to the Atlantic Provinces. The consequences of global acid precipitation will be alarming if it continues uncontrolled. The production of pollutants will increase as the standards of living of developing nations rise in the coming years.

The impact of acid precipitation is relevant to agriculture because it clearly results in increased soil acidity. However, soils are a complex dynamic environment. The severity and significance of acid precipitation have to be evaluated with respect to other changes occurring in soils. Hydrolysis of cations is an acid-producing reaction continuously occurring in soils. In soils located in cold climates, where processes of formation are slow and reactions are in harmony with nature, the sudden change in one parameter will most likely influence others. With our current knowledge of soil management and soil formation, the acidification of soils situated in fragile environments should be considered undesirable.

For the soils which are under cultivation for agricultural crops, the impact of acid rain has to be evaluated with respect to increasing soil acidity due to management practices. For example, the soils of southwestern Ontario have been increasingly depleted of basic cations over the years and now some of these soils are acid where they were neutral about fifty years ago. At the Harrow Research Station the continous application of nitrogen fertilizers to corn has decreased the pH of some plots to 4.8 compared with a pH of 6.8 under control treatments.

Application of commercial fertilizer to agricultural soils has been increasing steadily throughout the world and many of these fertilizers produce acidic reactions in soils similar to those that occur when rain water comes in contact with acidity-producing pollutants such as SO_x and NO_x. Thus evaluation of the impact of acid precipitation on soils also requires consideration of the soil type; location of the area; factors of soil formation already prevailing; maturity of the soils; and current use and soil management practices of the area.

The probable values of atmospheric acid inputs to soils of eastern Canada are in the range of 20 to 40 μeq/100 g soil per year (wet and dry). When expressed in terms of lime, this is equivalent to a $CaCO_3$ content of 20 to 40 kg/ha per year. Based upon these present levels of acidity from pollutants in precipitation, it is reasonable to conclude that changes in pH due to this process will be modest on agricultural soils and are of little consequence where liming is one of the agricultural management practices. As well as contributing to rainfall acidity, sulfur is a macronutrient so that which enters the soil via the atmosphere can be used by plants. Where soils are inadequately supplied with sulfur through mineralization of organic matter or weathering of parent materials, atmospheric sources may substitute for sulfur soil amendments.

The effect of atmospheric pollutants on vegetation may be due to direct contact with SO_x and NO_x emissions and due to contact with acidic precipitation, as well as the indirect effect of acid soils on root systems. Gaseous SO_x appears to have a greater effect on plants compared with surface deposition, and a number of crops are susceptible to damage by air pollution through this route. The few data which are available for rural areas suggest that ambient SO_2 concentrations are well below those which have been established for damage to most crops.

However, the paucity of data, and the possibility of synergistic effects among air pollutants, leaves little opportunity to evaluate the overall significance of present or future SO_2 effects on crop yields. It must therefore be concluded that a cautious position is indicated, until further data are available. Little evidence has appeared to support the concept of significant direct foliar damage by acid rain. There is some question, however, of the possible weakening of the resistance of plant foliage to attack by fungi, viruses and insect pests. These fears have not been adequately justified up to the present time. The type of vegetation is an important consideration in discussion of the above effects, e.g. the impact may well be different on perennial vegetation such as forests compared with annual vegetation such as agricultural crops.

There is limited information on the effect of pollutants on agricultural crops on a field scale. However, in recent years some work has been reported under laboratory conditions. For a proper evaluation it seems especially important for agricultural crops that observations be extended to field conditions. The dynamic nature of the environment cannot be investigated in isolation. The effects will depend upon the duration of exposure, wind conditions, temperature and physiological states of crop canopies (deposition velocities),and the amount and rate of precipitation, amongst others.

There is another question which may merit discussion and consideration with respect to acidity and crop breeding. On a global scale, acidity is on the increase in most productive agricultural soils. Crop varieties developed to give optimum performance at a pH of 6, for example, are being grown where soil pH has decreased to 5. Can we develop crop varieties which will give better performance at pH 5?

Agricultural Concerns Related to Acid Precipitation

i) Soils

The impact of acidic precipitation is modest on agricultural soils as compared to the prevalent soil fertility management practices (e.g. application of nitrogen fertilizers). However, we should be aware that the rates and amounts of emissions of acid-forming pollutants may increase in future. Agronomists should concern themselves with total acidity development in soils (all sources) and with changes taking place in the soil environment. The development of soil acidity, if not controlled and if not maintained at a suitable level, can result in dissolution of clay minerals, decrease in cation exchange capacity, increase in fixation of plant nutrients, release of toxic elements, etc. There is general consensus amongst soil scientists that soil management practices for most crops are acidity forming when liming is not a component of the program.

Some of the concerns with regard to soil acidity are:

- to evaluate the present status of our agricultural soils with respect to soil reaction (pH);
- to evaluate the role of management practices in the development of soil acidity;

- to establish the soil pH which will be least destructive to the soil/plant environment and will maintain optimum base saturation status;
- to assess the need for a built-in mechanism for maintaining soil acidity at a certain level when making fertilizer recommendations (e.g. liming included to neutralize the acidity due to fertilizer application).

Map 1, showing the sensitivity of agricultural soils in eastern Canada and the probable soil-affecting acid input from the atmosphere, can be used to identify areas of high load and high sensitivity. In general, the highest loadings coincide with areas of least soil sensitivity. Exceptions to this generalization are the sandy soils along the north shore of the St. Lawrence river in Quebec and some areas in the Shield region of south-central Ontario. Other areas to note are the moderately sensitive sandy soils of southwestern Ontario and western New Brunswick which fall into high acid fallout zones. Unpublished data have been compiled by the senior author* to show the distribution of nitrogen fertilizer use and applications of lime in eastern Canada. It is noteworthy that most of the sensitive soils east of the Kingston, Ontario area receive sufficient lime, on average, to offset inputs of acidity from both fertilizers and acid rain. This is not the case, however, in southwestern Ontario where susceptibility to acid rain persists in the moderately sensitive sandy soils of the region.

ii) Crops

Our knowledge of the effects on crops of prevailing atmospheric conditions, during growing periods, is limited. This applies both on a field scale and also under controlled conditions. For the evaluation of the effects of NO_x, SO_x and acidity of rain, reliable information is needed from which to establish relevant experiments. Total amounts of pollution over a certain period (e.g. for a year) are of limited value. Improved monitoring and research programs are required for: the deposition velocities for gaseous pollutants and how these are affected by variations in the physiological conditions of crop canopies; the concentration of gases in the air; the pH of rain and variation in pH with time; the pattern of rainfall and how concentrations of pollutants vary with different stages of crop growth. There are some programs already in effect where this type of monitoring information is being collected. Agriculturalists should use these data in evaluating the influence of pollutants on agricultural crops. In conjunction with these, field observations should be made during the growing period of various crops and related to the atmospheric conditions and components.

---

* An Assessment of the Degradation of Agricultural Land in Canada. D.R. Coote, J. Dumanski, J.F. Ramsey. Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa (manuscript in preparation).

Map 2 shows the distributions of weighted crop sensitivities to atmospheric SO_2 and shows that southwestern Ontario and the area south of Montreal have the greatest density of the more valuable and specialized sensitive crops. These two areas are also clearly those with the highest sulfur deposition levels and hence, by association, must be assumed to be those with the highest probability of atmospheric SO_2 pollution. These two areas, therefore, are those in which direct damage to crops may be of greatest potential significance.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Mrs. Lendvay-Zwickl and Mr. Leuty of the Land Resource Research Institute for providing us with information from the CanSIS file. Thanks also are extended to Dr. Beke, Mr. MacDougall and Mr. Cossette of the Soil Survey of Canada, and to the Provincial Soil Testing Laboratories of P.E.I., Nova Scotia, New Brunswick, Quebec and Ontario for providing summaries of their surface soil pH data for agricultural land. The assistance of Mr. John Ramsey, Ms. Lucie Mongeon, Ms. Karen Burns and Ms. Doris Kostolvik, of the Land Resource Research Institute, with the preparation of this report is gratefully acknowledged.

REFERENCES

Acres Consultants. Atmospheric loading of the lower Great Lakes and the Great Lakes Drainage Basin. Pollution from Land Use Activities Reference Group, IJC, Windsor, Ont. 70 pp.; 1977.

Atmospheric Environmental Service. CANSAP Data Summary. Environment Canada, Downsview, Ont. (quarterly); 1977 to 1979.

Bache, B.W. The acidification of soils. Pages 183-202 in T.C. Hutchinson and M. Havas, eds. Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems. Proc. of NATO Adv. Res. Inst. Conf., Toronto; 1979.

Barrie, L.A.; Weibe, H.A.; Anlauf, K.; Fellin, P. The Canadian air and precipitation monitoring network APN. Pages 355-360 in Proc. 14th Intl. Colloqu. Paris, May 5-8. M.M. Bernarie ed., Studies in Environmental Science, Vol. 8; 1980.

Bennett, J.H.; Hill, A.C. Interactions of air pollutants with canopies of vegetation. Pages 273-306 in J.B. Mudd and T.T. Kozlowski, eds. Responses of Plants to Air Pollution. Academic Press; 1975.

Berry, R.L. The Canadian Network for Sampling Precipitation (CANSAP) Project. Atmospheric Environment Service, Environment Canada, Downsview, Ont. 9pp.; 1979.

Brady, N.C. The nature of properties of soils, 9th Ed. MacMillan, N.Y., Chap. 16; 1974.

Cameron, D.R.; Neilsen, G.J.; Culley, J.L.B.; DeJong, R.; Findlay, W. Nitrogen movement in tile-drained clay and sandy agricultural watersheds. Final Report, Project 13, Agricultural Watersheds Studies, PLUARG, IJC, Windsor, Ont. 97pp.; 1977.

Evans, L.S.; Curry, T.M. Differential responses of plant foliage to simulated acid rain. Am. J. Botany 66:953-962; 1979.

Fisheries and Environment Canada. Hydrologic Atlas of Canada. Supply and Services Canada, Ottawa; 1978.

Fowler, D. Wet and dry deposition of sulphur and nitrogen compounds from the atmosphere. Pages 9-27 in T.C. Hutchinson and M. Havas, eds. Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems, Proc. NATO Adv. Res. Inst. Conf. Toronto, Ont.; 1978.

Gravenhorst, G.; Beilke, S.; Betz, M.; Georgii, H-W. Sulfur dioxide absorbed in rain water. Pages 41-56 in T.C. Hutchinson and M. Havas, eds. Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems. Proc. NATO Adv. Res. Inst. Conf., Toronto, Ont. 1978.

Grennfelt, P.; Bengston, C.; Skarby, L. An estimation of atmospheric input of acidifying substances to a forest ecosystem. Pages 29-40 in T.C. Hutchinson and M. Havas, eds. Effect of acid precipitation on terrestrial ecosystems. Proc. NATO Adv. Res. Inst. Conf. Toronto, Ont.; 1978.

Katz, M.; Ledingham, G.A. (several papers in) Effect of sulphur dioxide on vegetation. Bull. 815, N.R.C., Ottawa; 1939.

Lee, J.J.; Needly, G.D.; Perrigan, S.C. Sulfuric acid rain effects on crop yields and foliar injury. U.S. Environmental Protection Agency Report No. 600/3-80-016; 1980.

Linzon, S.N. Effects of air-borne sulphur pollutants on plants. Pages 109-162 in J.O. Nriagu, ed. Sulphur in the environment, Pt. II, Ecological impacts. John Wiley and Sons; 1978.

Malvern, R.J.; Paterson, W.M.; Grey, G.D. An approach to mapping air pollution sensitive crops in Ontario. Ontario Hydro. 73rd Air Poll. Control Assoc. An. Meeting, Montreal, June 25; 1980.

McBean, G.A. Long-range transport and deposition of acidic substances across national boundaries. AES, Downview, Ont., 73rd Air Poll. Cont. Assoc. An. Meeting, Montreal, June 22-27; 1980.

McFee, W.W. Sensitivity of soil regions to long term acid precipitation. U.S. Environmental Protection Agency Report No. 600/3-80-013; 1980.

Mudd, J.B.; Kozlowski, T.T., eds. Responses of plants to air pollution. Academic Press; 1975.

Neumann, H.H. Meteorological conditions associated with air pollution injury to plants. Pages 118-121 in Proc. A.E.S. Workshop on Agromet., U. of Guelph; 1980.

Nriagu, J.O., ed. Sulphur in the environment, Pt. II, Ecological impacts. John Wiley and Sons; 1978.

Nyborg, N. Sulfur pollution and soil. Pages 359-390 in J.O. Nriagu, ed. Sulfur in the environment, Pt. II, Ecological impacts. John Wiley and Sons; 1975.

Nyborg, M.; Walker, D.R. An overview - the effects of sulphur dioxide emmission on the acidity and sulphur content of soils. Pages 165-195 in H.S. Sandu and M. Nyborg, eds. Proc. Alta. Sulphur Gas Research Workshop III, U. of Alta, Edmonton; 1977.

Overrein, L.N. Acid precipitation - impacts on the natural environment. Pages 1-6 in H.S. Sandu and M. Nyborg, eds. Proc. Alta. Sulphur Gas Research Workshop III, U. of Alta., Edmonton; 1977.

Pender, G.F.; Jones, J.F. Determination of the groundwater component of peak discharges from the water chemistry of total runoff. Water Resources Research 5(2):438-445; 1969.

Penney, D.C.; Henry, J.L. Reaction of fertilizer N with soil components. Pages 275-298 in Proc. Western Canadian Nitrogen Symp., Alta. Soil Sci. Workshop, Calgary; 1976.

Rennie, P.J. The susceptibility of eastern Canadian terrestrial ecosystems to long-range pollution. Canadian Forestry Service, Environ. Can., Ottawa (Unpublished); 1979.

Rennie, P.J.; Halstead, R.L. The effects of sulfur on plants in Canada. Pages 69-179 in Sulphur and its inorganic derivatives in the Canadian environment. National Research Council Canada. NRCC No. 15015; 1977.

Russell, E.W. Soil conditions and plant growth. Longmans, London, 9th Ed. Chap. 22; 1961.

Taylor, O.C. Phytotoxic air pollutants and their sources. Symp. on the Effects of Airborne Pollution on Vegetation; E.C.E., Warsaw, Poland; 1979.

Wang, C.; Coote, D.R. Sensitivity classification of agricultural land to long-term acid precipitation. Research Branch, Agriculture Canada, 9pp.; 1981.

Whelpdale, D.M. Regional-scale measurements of precipitation, composition and deposition. Paper Pres. at W.M.O. meeting, Boulder, Colorado, U.S., August 20-24, Atmos. Environ. Serv., Environ. Can., Downsview, Ont.; 1977.

Whelpdale, D.M.; Galloway, J.N. An atmospheric sulphur budget for North America. Paper pres. at W.M.O. meeting, Sofia, Bulgaria, Oct. 1-4, Atmos. Environ. Serv., Environ. Can., Downsview, Ont.; 1979.

Whitely, H.R.; Ghate, S.R. Hydrologic Model Project. Final Report, Project 15, Agricultural Watershed Studies, PLUARG, I.J.C., Windsor, Ont. 100 pp.; 1978.

Agriculture Canada

Research Branch | Direction générale de la recherche

Importance des précipitations acides pour l'agriculture dans l'est du Canada

Canada

Importance des précipitations acides pour l'agriculture dans l'est du Canada

D.R. COOTE
Institut de recherche sur les terres
D. SIMINOVITCH
Institut de recherche chimique et biologique
S. SHAH SINGH
Institut de recherche chimique et biologique
C. WANG
Institut de recherche sur les terres

Contribution nº 119 de l'Institut de recherche sur les terres

Contribution nº 1236 de l'Institut de recherche chimique et biologique

---

Direction générale de la recherche
Agriculture Canada
1982

On peut obtenir des exemplaires de
cette publication de
D.R. Coote
Institut de recherche sur les terres
Direction générale de la recherche
Agriculture Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0C6

ou de

S. Shah Singh
Institut de recherche chimique et biologique
Direction générale de la recherche
Agriculture Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0C6

Production du Service des programmes de recherche

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1982

TABLE DES MATIERES

RESUME.....v

INTRODUCTION.....1

SENSIBILITE DES TERRES AGRICOLES AUX PRECIPITATIONS ACIDES A LONG TERME.....1
- Classes de sensibilité.....1
- Estimation des bases échangeables.....2
- Guide de détermination des classes de sensibilité des sols.....3
- Carte de sensibilité des sols (carte 1).....3
- Effets des pluies acides sur les sols.....7

EFFETS DES PLUIES ACIDES ET DE LA POLLUTION PAR GAZ CONNEXE SUR LES CULTURES.....12
- Principaux polluants atmosphériques nocifs pour les plantes et leur mode d'action.....13
  - i) Dioxide de soufre (SO_2).....13
  - ii) Oxydes d'azote (NO, NO_2), nitrates de peroxyacyle (NPA) et ozone.....16
- Evaluation des effets actuels et éventuels de la pollution atmosphérique sur les cultures.....16
- Effets des pluies acides sur les cultures.....21

DISCUSSION ET CONCLUSIONS.....22
- Problèmes agricoles causés par les précipitations acides.....25
  - i) Sols.....25
  - ii) Cultures.....26

REMERCIEMENTS.....27

BIBLIOGRAPHIE.....28

TABLEAUX

Tableau 1 Guide de détermination de la sensibilité des sols aux précipitations acides..... 4

Tableau 2 Superficie de chaque classe de sensibilité des terres agricoles de l'est du Canada.....18

Tableau 3 Types de cultures sensibles.....21

FIGURE

Relation entre le pH (H_2O) et le pourcentage de saturation basique..... 4

CARTES

Carte 1 Sensibilité des terres agricoles aux précipitations acides à long terme et moyenne annuelle des dépôts (humides et secs) atmosphériques de substances acides modifiant les sols (1977-1979) - Est du Canada..... 5

Carte 2 Sensibilité des cultures à la pollution par SO_2 et moyenne annuelle des dépôts (humides et secs) atmosphériques de soufre (1977-1979) - Est du Canada.....19

RESUME

Les précipitations qui tombent sur les terres agricoles de l'est du Canada contribuent à l'acidification des sols et des cultures. On a, dans le but d'évaluer la portée des problèmes qui peuvent affecter l'agriculture, élaboré des critères de sensibilité des sols et étudié des faits indiquant des dommages aux végétaux.

Les sols ont été classés en sols sensibles, modérément sensibles ou non sensibles en fonction du degré estimé de déperdition de bases échangeables dans la couche labourée suite à 25 années de précipitations acides qui correspondent à des apports équivalant au taux le plus élevé actuellement noté dans la région. Environ 70% des sols agricoles de l'est du Canada font partie de la classe des non sensibles, mais 25% des sols agricoles du Québec sont dans la classe des sols sensibles et la majorité des sols de l'Ile-du-Prince-Edouard font partie des classes sensibles ou modérément sensibles.

Peu de faits indiquent l'existence de dommages directs aux cultures résultant des pluies acides, mais l'on connaît des effets indirects causés par l'acidification du sol. On s'inquiète cependant de la possibilité d'une détérioration chronique des tissus du feuillage qui pourrait résulter de la présence de dioxyde de soufre, un responsable de l'acidité des précipitations, dans l'air pollué. Il pourrait aussi y avoir interactions synergiques du SO_2 avec d'autres polluants atmosphériques ce qui provoquerait des dommages au feuillage. Il faudra disposer de meilleures données sur les cultures et la surveillance de l'air dans les régions agricoles pour évaluer ces effets possibles.

Les sulfates, les nitrates et l'ammonium sont des constituants des précipitations acides qui modifient l'acidité des sols. Des estimations indiquent que l'acidification nette des sols agricoles de l 'est du Canada provoquée par les dépôts (secs et humides) atmosphériques varie de 25 à 40 kilogrammes par hectare par an d'équivalent de carbonate de calcium (calcaire). L'importance de cette acidification est inférieure de deux à dix fois à celle qui résulte de l'épandage de fertilisants azotés sur les terres cultivées. Les processus naturels qui se déroulent dans les sols contribuent aussi à l'acidification et il est parfois nécessaire d'effectuer le chaulage de certains sols.

Il y aura acidification, même en l'absence de précipitations acides, des sols sensibles actuellement fertilisés par des engrais azotés et sur lesquels on n'effectue pas régulièrement des épandages de chaux. Le processus qui se déroule dans ces sols peut être quelque peu accéléré par les précipitations

acides. Ces précipitations auront peu d'effet sur les sols régulièrement et adéquatement chaulés. Des composantes de la pollution de l'air qui ne sont pas nécessairement de nature acide peuvent présenter, à long terme, un danger plus important pour la qualité des sols et l'agriculture, mais on dispose de peu de données pour en évaluer l'importance.

INTRODUCTION

Une grande partie des terres agricoles les plus productives du Canada sont situées dans les basses terres des Grands Lacs et du Saint-Laurent et dans les régions atlantiques. Ces régions sont aussi celles du Canada où les pluies acides risquent de causer le plus de problèmes. Il est donc important d'étudier les effets des pluies acides sur les sols agricoles et les cultures, et de déterminer la nature et l'importance de tous les effets nuisibles qui se sont peut-être déjà produits ou qui pourraient se manifester dans un avenir prévisible.

La présente publication contient les résultats d'une évaluation préliminaire, effectuée par Agriculture Canada, des effets des pluies acides sur l'agriculture dans l'est du Canada. Le rapport traite de la question selon quatre principaux volets: la sensibilité des sols à l'acidification et les modifications des bases causées par les pluies acides; l'estimation de la répartition et de l'importance actuelle des pluies acides altérant les sols; les effets des pluies acides et de la pollution par gaz associé sur les cultures; et l'importance de ce problème pour l'agriculture.

SENSIBILITE DES TERRES AGRICOLES AUX PRECIPITATIONS ACIDES A LONG TERME

Les données disponibles sur les caractéristiques des sols relatives aux bases échangeables et des hypothèses fondées sur l'état actuel de nos connaissances en pédologie ont été utilisées pour élaborer une méthode pratique d'évaluation de la sensibilité des sols aux précipitations acides (Wang et Coote, 1981). La méthode fait appel au pH du sol en solution aqueuse et à la texture du sol pour en évaluer les bases échangeables. L'estimation obtenue sert à déterminer des classes de sensibilité des sols aux précipitations acides.

Classes de sensibilité

Les bases échangeables d'un sol en reflètent la capacité à neutraliser l'acidité apportée par les précipitations. Plus il y a de bases échangeables disponibles, plus le pouvoir neutralisant du sol est élevé et moins importante est l'influence des précipitations acides sur le pH du sol.

La couche labourée des sols canadiens est d'environ 15 cm. Si l'on suppose que la densité de cette couche est de 1,3 g/cm^3 et que l'apport maximum d'acidité, en équivalent de $CaCO_3$, est de 60 kg/ha par an (d'après des données chimiques sur les précipitations et des estimations des dépôts secs), on calcule qu'un sol donné de l'est du Canada recevra en 25 ans un maximum

de 1,5 milli-équivalent (méq) d'acidité atmosphérique par 100 g de sol. Si l'on suppose qu'une perte de 10 à 25% des bases échangeables de la couche labourée a des effets importants (McFee, 1980), on peut alors définir trois classes de sensibilité du sol aux pluies acides:

1) Sensible - La teneur en bases échangeables du sol est inférieure à 6 méq/100 g de sol (plus de 25% des bases échangeables peuvent être éliminées en 25 ans).
2) Modérément sensible - La teneur en bases échangeables du sol se situe entre 6 et 15 méq/100 g de sol (de 10 à 25% des bases échangeables peuvent être éliminées en 25 ans).
3) Non sensible - La teneur en bases échangeables du sol est supérieure à 15 méq/100 g de sol (moins de 10% des bases échangeables peuvent être éliminées en 25 ans).

Estimation des bases échangeables

On peut supposer, pour les sols de surface calcaires, que le pouvoir tampon est supérieur à 15 méq/100 g et que le sol n'est pas sensible aux précipitations acides.

Dans les sols de surface non calcaires (sols sans carbonates libres), les bases échangeables dépendent surtout de la capacité d'échange cationique (C.E.C) et du pH. La C.E.C. dépend à son tour en grande partie de la quantité et du type d'argile et de matières organiques présentes. Il y a aussi interaction entre la C.E.C. et le pH dans un sol donné, ce qui complique la prévision des bases échangeables dans les sols non calcaires. Les hypothèses suivantes ont cependant été faites dans le but de permettre l'estimation des bases dans les sols afin d'établir les classes de sensibilité suivantes:

1) Les types de minéraux argileux des sols de surface de l'est du Canada sont semblables.
2) La variation de la teneur moyenne en matières organiques des sols de surface, pour de grandes surfaces, est relativement faible dans la plupart des terres cultivées de l'est du Canada.

Si l'on tient compte de ces deux hypothèses, les variables d'estimation des bases échangeables sont la texture (surtout la teneur en argile) et le pH du sol. La texture du sol sert à estimer la C.E.C., et le pH, le pourcentage de saturation basique. Le produit de la C.E.C. par le pourcentage de saturation basique fournit une mesure des bases échangeables présentes dans le sol.

Guide de détermination des classes de sensibilité des sols

On note, pour la majorité des sols de surface cultivés, que la C.E.C. (charge permanente des sols de diverses classes de texture s'établit ainsi: de 25 à 40 méq/100 g - argileux; de 10 à 15 méq/100 g - loameux; et de 2 à 10 méq/100 g - sableux. L'incorporation de ces données à la relation générale entre le pH et le pourcentage de saturation basique du sol (voir la figure), nous fournit un guide d'estimation de la sensibilité approximative du sol aux précipitations acides (tableau 1).

Carte de sensibilité des sols (carte 1)

Les données nécessaires à la compilation de la carte de sensibilité des sols aux précipitations acides à long terme (carte 1) ont été obtenues des sources suivantes:

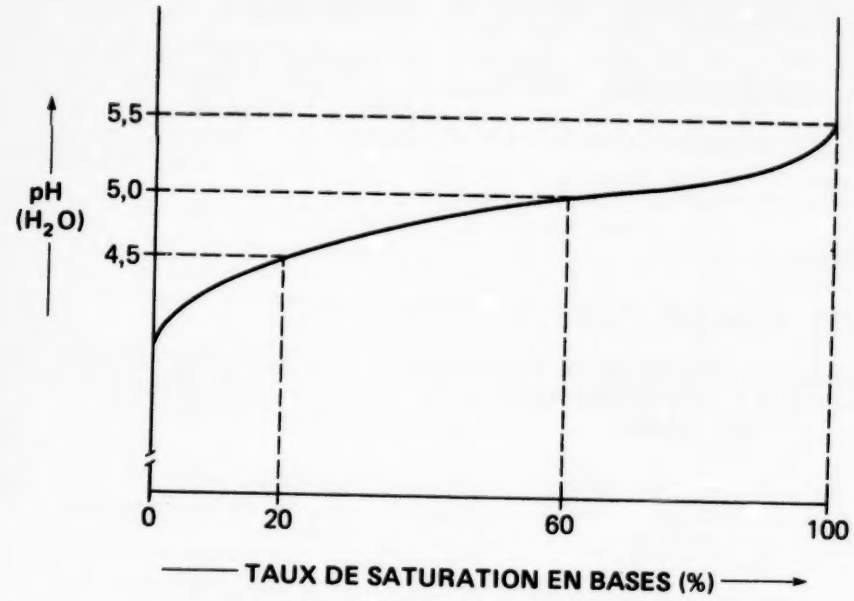
1) Système informatique des sols canadien (SISCan)
2) Rapports de prospections pédologiques publiés ou provisoires
3) Laboratoires provinciaux d'analyse des sols

Les renseignements relatifs à la texture et au pH de la couche de surface de chaque zone de la carte ont permis d'assigner à chacune de ces zones une classe de sensibilité en fonction des lignes générales présentées au tableau 1.

L'information générale provenant de la carte de sensibilité des sols est résumée au tableau 2. A l'exception de l'Ile-du-Prince-Edouard, la plus grande partie des terres agricoles de l'est du Canada ne sont pas sensibles aux précipitations acides.

On n'a pas pris en considération les pratiques de gestion des sols lors de la préparation de la carte. Les agriculteurs qui gèrent avec soins leurs fermes épandent périodiquement la quantité de chaux nécessaire au maintien du pH désiré. L'importance de l'acidité des précipitations acides sera généralement, dans ces cas, très faible comparativement à la quantité de chaux normalement utilisée.

Les sols sableux, comme ceux souvent utilisés pour la culture des bleuets, des fraises, du tabac et des pommes de terre, peuvent se montrer sensibles aux précipitations acides étant donné leur pouvoir tampon relativement faible et leur bas pH. Il est donc nécessaire de traiter



Rapport entre le pH du sol (dans l'eau) et le taux de saturation en bases

Tableau 1 Guide de détermination de la sensibilité des sols aux précipitations acides

Classes de sensibilité	Caractéristiques du sol*
Non sensibles	Tous les sols calcaires Sols argileux de pH 5,0 Sols loameux de pH 5,5
Modérément sensibles	Sols sableux de pH 5,5 Sols argileux de pH 4,5 - 5,0 Sols loameux de pH 5,0 - 5,5
Sensibles	Sols argileux de pH 4,5 Sols loameux de pH 5,0 Sols sableux de pH 5,5

* Couche labourée d'environ 15 cm d'épaisseur. On suppose que le chaulage ne fait pas partie des pratiques agricoles courantes. Le pH du sol est mesuré en solution aqueuse.

Sensible – Contenant moins de 6 méq de bases échangeables pour 100 g de sol de surface (plus de 25% des bases pourraient être épuisées d'ici 25 ans)

Moyennement sensible – Contenant de 6 à 15 méq de bases échangeables par 100 g de sol de surface (de 10 à 25% des bases pourraient disparaître d'ici 25 ans)

Non sensible – Contenant plus de 15 méq de bases échangeables par 100 g de sol de surface (moins de 10% des bases pourraient disparaître d'ici 25 ans)

Non classée – Terre non agricole

CARTE 1. SENSIBILITÉ DES TERRES AGRICOLES† À L'EXPOSITION PROLONGÉE AUX PRÉCIPITATIONS ACIDES ET VALEURS MOYENNES ANNUELLES ESTIMATIVES DES DÉPÔTS ATMOSPHÉRIQUES (HUMIDES ET SECS) D'ACIDITÉ (1977-1979)* EST DU CANADA

† Nota: à cause de la généralisation associée à l'établissement de la carte, certaines zones indiquées comme agricoles peuvent renfermer des terres non agricoles.

* Données de CANSAP, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview, Ontario. Y compris 40% de dépôts à l'état sec (approx.) en μéq par 100 g de sol, par an. Calculée et interpolée par D.R. Coote, Institut de recherche sur les terres, Agriculture Canada, Ottawa.

Information pédologique réunie par C. Wang, Institut de recherche sur les terres, Direction générale de la recherche, Agriculture Canada, Ottawa. Les surfaces en culture ont été extrapolées de cartes au 1/50 000 par Claire Gosson, Services de géographie, Direction des levés et de la cartographie, ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources, Ottawa.

Carte dressée et tracée par la Section de la cartographie, Institut de recherche sur les terres, Direction générale de la recherche, Agriculture Canada. Imprimée par le Centre de reproduction des cartes, Energie, Mines et Ressources, Ottawa, 1981.

les sols sableux de façon appropriée. Les sols organiques de l'est du Canada tendent à être acides. Le sol organique présente une importante capacité d'échange par unité de masse, mais la faible densité apparente de ce sol (environ 10% de la valeur moyenne des sols minéraux) se traduit par un taux faible de bases échangeables. On les considère donc généralement comme sensibles ou modérément sensibles aux précipitations acides à long terme.

L'épandage de fertilisants azotés contribue souvent à l'acidité des sols (Penny et Henry, 1976), et ce, à des taux qui peuvent être de dix fois supérieurs à ceux des précipitations acides. L'accroissement de l'acidité des sols sensibles est donc plus probable si l'on effectue d'importants épandages de fertilisants azotés. Ainsi, la plus grande partie des terres productives de pommes de terre de l'Ile-du-Prince-Edouard sont formées de sols sableux non calcaires et des épandages de fertilisants azotés sont effectués à des taux élevés. Il est essentiel d'utiliser la quantité appropriée de chaux dans ces sols sableux afin de maintenir le pH désiré, sinon ils s'appauvriront en bases échangeables et leur productivité sera réduite par manque de matières nutritives assimilables.

L'acidité des sols s'accroît aussi naturellement par l'acide carbonique produit par les racines des végétaux, les acides organiques qui proviennent de la décomposition de la matière organique présente dans le sol et la production de nitrate dans les sols cultivés (Bache, 1979).

L'échelle de la carte 1 ne permet d'obtenir des renseignements que pour des superficies relativement importantes. Elle ne doit donc pas être utilisée au niveau des fermes individuelles. On peut, pour les superficies moins importantes ou les fermes individuelles, évaluer les classes de sensibilité aux précipitations acides en utilisant les lignes directrices du tableau 1 après avoir procédé à la mesure manuelle de la texture et du pH (solution aqueuse) du sol.

Effets des pluies acides sur les sols

L'estimation des effets sur les sols de l'acidité des précipitations et du dépôt atmosphérique sec (généralement regroupés sous le terme de "pluies acides") pose plusieurs difficultés. L'acidité résultant de la pollution atmosphérique au Canada a été caractérisée en fonction du transport du soufre (ou du sulfate ou du bioxyde de soufre) (Rennie, 1979; Whelpdale et Galloway, 1979). La plupart des estimations des substances acidifiantes transportées par l'atmosphère ont d'ailleurs porté sur ces substances bien qu'il existe un bon nombre d'autres composés du soufre et de l'azote qui modifient l'acidité des précipitations et du dépôt de matières sèches (Grennfelt et al., 1978; Fowler, 1978). Whelpdale (1977) a aussi calculé, à partir de la mesure du pH, les apports en ion H^+ à des écosystèmes terrestres et aquatiques.

La seule mesure des apports de soufre ou d'ion H^+ des précipitations peut fausser les résultats de l'estimation des effets qu'ont les précipitations acides sur les sols. La mesure du seul soufre ne permet pas de tenir compte de la neutralité des sels de soufre comme ceux qui contiennent du calcium, du magnésium, du sodium, ou d'autres éléments semblables. Les effets acidifiants du nitrate et l'acidité produite par la nitrification de l'ammonium dans le sol sont aussi ignorés. Cette dernière source d'acidité peut être représentée par la réaction simplifiée suivante (Penney et Henry, 1976):

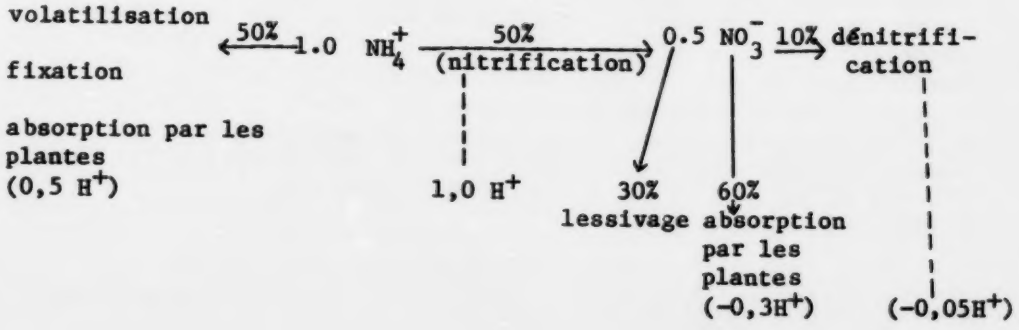
$$NH_4^+ + 2O_2 \xrightarrow[\text{(bactéries)}]{\text{nitrification}} NO_3^- + H_2O + 2H^+ \qquad (1)$$

L'utilisation de la charge en ion H^+ des précipitations permet de noter un effet net à l'équilibre entre le H^+ et les autres ions en solution qui tient compte des sels neutres et du nitrate, mais l'acidité du sol ayant l'ammonium comme source est encore ignorée.

Il semble préférable d'utiliser la charge en ion H^+, telle que mesurée par le pH des précipitations, que celle en soufre si l'on dispose aussi de la concentration en ammonium, de façon aussi à tenir compte de l'acidité due à cette source. Il ne suffit pas d'additionner la charge d'ammonium à la charge de H^+ pour tenir compte de son effet acidifiant car chaque ion NH_4^+ donne naissance à deux ions H^+ lors de la nitrification (éq. 1). Cependant on ne peut pas multiplier par deux la quantité initiale car une partie de l'ammonium sera probablement assimilée directement par les racines des végétaux, bien que le nitrate soit généralement la forme absorbée de façon préférentielle. A l'absorption d'une quantité donnée de NH_4^+ correspond la libération d'une quantité équivalente de H^+ car les racines maintiennent l'équilibre ionique (Russell, 1961). Des mécanismes semblables apparaissent quand les racines absorbent le nitrate ou quand il y a dénitrification. Ces processus sont cependant neutralisants car il y a libération des ions bicarbonates dans les exudats des racines et des ions OH^- (Ibid.). Le nitrate est rapidement lessivé du sol, dénitrifié ou absorbé par les racines des végétaux, ce qui tend à favoriser la poursuite de la nitrification et le processus acidifiant. Il faut cependant aussi tenir compte de l'effet neutralisant quand le NO_3^- de nitrification ou de précipitation est absorbé ou dénitrifié. Une certaine quantité du NH_4^+ est fixée par les minéraux de l'argile ou la matière organique qui tend à réduire la capacité d'échange cationique ce qui a pour effet de réduire le pouvoir tampon du sol. L'ammonium peut aussi être dissocié en NH_3, puis volatilisé ou fixé par la matière organique, tout cela tendant à l'acidification.

Il est nécessaire, pour estimer la contribution du NH_4^+ et du NO_3^- atmosphériques à l'acidité du sol, de faire certaines hypothèses sur l'importance de la nitrification, de la dénitrification et du lessivage. Les valeurs mesurées pour ces variables présentent des gammes étendues. Ainsi, Russell (1961) a signalé des taux de nitrification de 2 à 60% de l'azote ajouté selon les valeurs de l'humidité, de la température, du pH et de la teneur en oxygène du sol. Les pertes par lessivage qu'on a signalées allaient de 2 à 31% de l'apport en N et on a signalé aussi des valeurs variant entre 0 et 69% pour les pertes causées à la fois par le lessivage et par évaporation. Brady (1974) a présenté des données indiquant que la nitrification du NH_4^+ ajouté pouvait pratiquement être de 100% dans des conditions idéales d'humidité et de température. Cameron et al. (1977) ont estimé que les pertes causées à la fois par le sivage et par la dénitrification des apports totaux d'azote dans trois sols du sud de l'Ontario variaient de 0 à 48%.

Si on suppose pour les besoins de la généralisation, en se basant sur les données présentées ci-dessus, que 50% de l'azote ajouté au sol sous forme d'ammonium est nitrifié et que, de cette quantité, 30% est perdu par lessivage et 10% par dénitrification, on trouve que le sol retient environ 1,15 ion H^+ pour chaque ion NH_4^+ qui lui est apporté par les précipitations. L'équation schématique donnée plus bas illustre comment on en arrive à cette valeur nette.



Gain net de $H^+ = 0,5 + 1,0 - 0,3 - 0,05 = 1,15$

On trouve, en utilisant les mêmes hypothèses, qu'environ 70% du nitrate des précipitations est absorbé ou dénitrifié et qu'il y a libération de 0,7 équivalent neutralisant par équivalent nitrate. Cette valeur doit donc être soustraite de la charge en ion H^+ calculée à partir du pH et des teneurs en ammonium. Cette méthode ne fait pas appel au soufre pour l'estimation de l'acidité atmosphérique affectant le sol et a été utilisée dans le présent rapport.

L'acidité par dépôt sec est responsable de la source d'incertitude la plus importante lors de l'estimation de l'apport net de l'acidité atmosphérique surtout à cause de la difficulté de mesure. On a calculé que le dépôt sec de soufre dans l'est du Canada équivalait à environ 40% du dépôt humide obtenu à partir des concentrations et des vitesses de formation des dépots (Whelpdale et Galloway, 1979). Ce pourcentage estimé est plus faible que celui obtenu pour l'est des Etats-Unis (Ibid), mais similaire à celui noté pour le sud de la Norvège (Overrein, 1977). Nyborg et Walker (1977) ont signalé que, en été dans le centre de l'Alberta, le dépôt de soufre sous forme particulaire sèche était plus important que celui des pluies, mais que les particules étaient plutôt formées de sels neutres. Il y avait cependant sorption directe du bioxyde de soufre par les sols et l'oxydation en sulfate était rapide, le tout se traduisant par une acidification des sols. La sorption directe de l'ammonium et de l'acide nitrique en phase gazeuse a sans aucun doute des effets similaires après la nitrification, mais jusqu'à présent ces phénomènes ont été plus difficiles à mesurer que le dépôt sec de bioxyde de soufre. De plus, le sol est lui-même une source de NH_3 et d'oxydes d'azote volatilisés.

Il est nécessaire de faire d'autres hypothèses pour obtenir une estimation raisonnablement fiable de l'acidité due à la sédimentation sèche. Fowler (1978) a signalé que les taux de dépôt sec des oxydes d'azote, sous forme gazeuse ou particulaire, devaient être aussi importants, sinon plus, que ceux du dioxyde de soufre. Il est donc raisonnable de supposer que le taux de dépôt sec approximatif pour l'est du Canada de 40% du dépôt humide, pour le soufre, peut aussi s'appliquer à la charge "nette" d'ion H^+ calculée pour toutes les formes de soufre et d'azote du dépôt humide. Cette méthode permet aussi de tenir compte des sels neutres du soufre car elle est basée sur les ions H^+, NO_3^- et NH_4^+ plutôt que sur la simple teneur en soufre des précipitations.

Des données sur la chimie des précipitations (pH, conductivité, teneur en huit importants ions) ont été recueillies mensuellement en 50 points du Canada depuis 1977 par le Service de l'environnement atmosphérique, dans le cadre du programme du réseau d'échantillonnage des précipitations CANSAP (Berry, 1979). Ce sont eux qui ont servi à préparer les estimations des dépôts secs et humides pour l'est du Canada que l'on peut trouver à la carte 1. Les données ont été traitées en tenant compte des hypothèses présentées plus haut. Les concentrations "nettes" en ion H^+ ont été corrigées (C_s) pour tenir compte des différences entre les quantités échantillonnées et les précipitations mensuelles totales en procédant selon la méthode du S.E.A. (comm. pers., D. Whelpdale, S.E.A., Downsview, Ont.). A savoir:

A savoir:

$$C_s = (\{ H^+\} + 1{,}15\ \{ NH_4^+\} - 0{,}7\ \{ NO_3^-\})(1+P_c/P_s)/2 \qquad (2)$$

où: $\{ H^+\}$, $\{ NO_3^-\}$ et $\{ NH_4^+\}$ sont respectivement les concentrations mesurées d'ions d'hydrogène, de nitrate et d'ammonium en moles/litre des prélèvements mensuels accumulés de précipitations; et Pc et Ps sont, respectivement, l'importance, en millimètres, de la précipitation mensuelle accumulée dans l'échantillonneur et cette même valeur pour un pluviomètre standard adjacent. Cette correction suppose que la valeur insuffisante de la réception (influence aérodynamique et sensibilité du déclencheur de l'échantillonneur) et l'évaporation sont également responsables du fait que Pc est généralement inférieur à Ps.

On a ensuite déterminé la sédimentation annuelle (D_a, en moles x 10^4 par ha) de la façon suivante:

$$D_a = 1{,}4 \left(\sum_{s=1}^{n} C_s \cdot P_s\right) P_a / \sum_{s=1}^{n} P_s \qquad (3)$$

où P_a est la précipitation totale annuelle, en millimètres, d'un pluviomètre standard (y compris les estimations de neige) et est le nombre de mois d'échantillonnage. Les résultats ont ensuite été exprimés en milli-équivalents de H^+ par 100 g de couche labourée de sol (en supposant une couche labourée de 15 cm présentant une densité apparente de 1,3 g/cm^3). Nous disposions de données pour 1977, 1978 et 1979. Les valeurs d'acidité ainsi obtenues ont été reportées et l'on trouvera leur distribution à la carte 1.

La distribution indique clairement l'influence des vents dominants d'ouest qui transportent l'acidité atmosphérique des régions industrielles du centre des Etats-Unis et de l'Ontario, traversent le sud de l'Ontario et atteignent la vallée du Saint-Laurent où il se produit un autre apport d'acidité ayant pour origine les industries de cette région et du sud du Québec. Les phénomènes de dépôt et de dispersion se traduisent par des apports d'acidité pour les sols décroissants à mesure que cette masse d'air se déplace encore plus vers l'est.

La perte des produits de précipitation par le ruissellement direct des eaux de pluie et de fonte des neiges sur le sol lors du mouvement vers les cours d'eau, qui contribuent ainsi peu à l'acidification du sol, est un autre phénomène qui doit être pris en considération. Dans l'est du Canada, l'écoulement des cours d'eau présente environ 25% de la valeur des précipitations dans le sud-ouest de l'Ontario, ce pourcentage atteint environ 75% en

Nouvelle-Ecosse (Pêcheries et Environnement Canada, 1978). Des estimations faites pour le sud de l'Ontario indiquent qu'environ 55 à 70% de cet écoulement se produit sous forme de ruissellement de surface (Whitely et Ghate, 1978), ce qui correspond aux données pour la Nouvelle-Ecosse en été (Pender et Jones, 1969). La composante ruissellement est probablement plus importante au printemps. Le pourcentage moyen de l'acidité atmosphérique qui ne pénètre jamais dans le sol peut donc varier de 14% dans le sud-ouest de l'Ontario à environ 50% en Nouvelle-Ecosse. Ce facteur ne peut servir à estimer les apports en acidité atmosphérique dans une zone donnée sans que l'on connaisse les caractéristiques du ruissellement dans cette zone, mais il indique cependant que les apports moyens seront moins importants que ceux estimés à partir de la chimie des précipitations (carte 1), tout spécialement dans les provinces de l'Atlantique.

EFFETS DES PLUIES ACIDES ET DE LA POLLUTION PAR GAZ CONNEXE SUR LES CULTURES

Les expressions pluies ou précipitations acides sont devenues populaires et englobent souvent une grande variété de composantes de la pollution de l'air qui ne sont pas nécessairement acides ou dissoutes dans les précipitations. Le transport à longue distance des polluants atmosphériques étant généralement associé aux précipitations acides, on en traite ici pour les composantes qui ont un effet sur les cultures.

Les émissions ayant pour sources l'industrie, la production d'énergie et les activités urbaines continuent de menacer la qualité de notre environnement ainsi que nos ressources forestières et agricoles. Une grande partie des dommages est causée par la pollution atmosphérique ayant pour origine des acides produits dans les eaux de pluie par des gaz polluants, comme le SO_2. Nous possédons des preuves de la destruction de la vie dans des lacs ainsi que de dommages aux forêts causés par cette pollution, mais nous ne possédons pas de faits qui indiquent nettement que des dommages ont été causés, à une échelle notable, au niveau du rendement des cultures.

Des essais ont été effectués en laboratoire dans le but de simuler les effets de l'acidité des précipitations sur les cultures (Lee et al., 1980), mais les effets correspondants sur le terrain n'ont pas fait l'objet de publications en nombre suffisant (Neumann, 1980). Les dommages aux cultures causés par le SO_2 gazeux notés en laboratoire ont cependant aussi été notés sur le terrain dans les lieux où la pollution atmosphérique par SO_2 atteignait des concentrations similaires (Katz et Ledingham, 1939). On peut prévoir des dommages aux cultures et des rendements diminués dans toutes les régions où la pollution par le SO_2 gazeux existe et s'accroît. L'évaluation des effets

de l'acidité des précipitations, en tant que telle, est plus difficile à effectuer. Elle doit être effectuée en fonction des effets directs sur le feuillage et des effets à long terme découlant de l'augmentation de l'acidité des sols produits par ces "retombées".

La section qui suit porte sur le problème des effets nocifs des pluies acides et des polluants atmosphériques connexes sur les plantes et, en dernier ressort, sur le rendement des cultures. On traitera aussi des facteurs nécessaires à l'évaluation de l'importance des effets actuels et futurs sur le rendement des cultures.

Principaux polluants atmosphériques nocifs pour les plantes et leur mode d'action

i) Dioxyde de soufre (SO_2)

Le SO_2 a été le premier polluant atmosphérique à être reconnu comme un important agent toxique pour les végétaux et les études classiques effectuées par Katz et Ledingham (1939) comptaient parmi les premières études complètes des lésions aux plantes provoquées par le SO_2. Taylor (1979) écrivait que, au niveau mondial, le SO_2 était probablement responsable de dommages à la végétation et de pertes économiques générales plus importants que tout autre polluant de l'air. La source la plus courante de SO_2 dans l'atmosphère est l'utilisation de combustibles fossiles. La pollution par le SO_2 a des effets directs et indirects sur les plantes.

Effets directs: Les plantes et les cellules végétales sont très perméables aux gaz. Le SO_2 gazeux peut endommager directement les plantes en pénétrant dans les stomates d'où il est directement absorbé sous forme gazeuse par les cellules intérieures de la feuille. Les conditions qui limitent l'ouverture des stomates limitent aussi les dommages par SO_2. La cuticule des feuilles constitue une barrière protectrice et les plantes qui en sont dépourvues, comme les mousses et les algues, sont très sensibles au SO_2 et peuvent donc être utilisées comme sujets d'essais biologiques efficaces (Mudd et Kozlowski, 1975).

Une fois à l'intérieur des cellules végétales, le SO_2 peut être transformé de diverses façons. Sa plus grande toxicité vient de sa transformation en sulfites qui, étant donné leur extrême réactivité, réagissent directement ou interfèrent avec des intermédiaires ou des processus métaboliques de la photosynthèse au niveau de réactions par radicaux libres ou superoxydes. La nature et la séquence exactes de ces réactions n'ont pas encore été complètement élucidées. Ces effets nocifs

sur les végétaux prennent la forme de lésions des chloroplastes et d'un mauvais déroulement de la photosynthèse (Ibid.). Le SO_2, une fois absorbé sous forme gazeuse, peut aussi être oxydé dans les cellules de la feuille, passer en solution et être hydraté en H_2SO_4. L'ion SO_4 peut ensuite participer normalement à plusieurs réactions végétales essentielles ou être intégré à des constituants, le soufre étant un élément essentiel à la vie des végétaux. Toutefois, une absorption excessive et la disparition du pouvoir tampon de la plante par sur-utilisation se traduisent par des dommages résultants d'une acidité directe au sein de la plante. Cela nuit à des processus vitaux. Dans les deux cas, l'entrée directe du SO_2 gazeux par les stomates est la première étape importante de la série de réactions responsables des principaux dommages aux végétaux et non le dépôt et le mouillage de la surface des feuilles par la pluie acide formée dans l'atmosphère.

Les études critiques des dommages directs aux plantes par le SO_2 portent presque exclusivement sur la composante gazeuse et les effets de celle-ci après son entrée par les stomates et son absorption par les cellules internes du mésophylle (Ibid.; Nriagu, 1978). Il y a ensuite altération de la photosynthèse et lésions de chloroplastes et de cellules. Les symptômes en sont généralement une décoloration des feuilles et une diminution inévitable des rendements des cultures. Les effets peuvent être immédiats, lésions aigues par sulfite, ou chroniques, par absorption cumulative de SO_4 au-delà du seuil du pouvoir tampon (Linzon, 1978). L'importance de l'absorption de SO_2 a été démontrée par des estimations (Bennett et Hill, 1975) indiquant qu'un couvert continu de luzerne assimilatrice pouvait tirer de l'atmosphère 88 kg de SO_2 par kilomètre carré par jour quand la concentration de SO_2 dans l'air était similaire à celle notée pour une zone de 5000 kilomètres carrés à proximité de Sudbury. L'absorption totale serait plus importante chez les plantes vivaces, comme les arbres et la luzerne, que chez les plantes annuelles mais moins importante chez les plantes cultivées que chez les arbres et les arbustes.

Rennie et Halstead (1977) ont passé en revue 23 publications où l'on mentionnait des concentrations seuils ou tolérables de SO_2 dans l'atmosphère. Les teneurs signalées diminuaient en fonction du temps, les plus faibles concentrations étant mentionnées dans les références les plus récentes (1971-1972). Celles-ci étaient d'environ 0,05 p.p.m. (environ 180 $\mu g\ m^{-3}$) pour les cultures et encore inférieures pour certaines espèces d'arbres. Ces valeurs sont considérablement plus importantes que celles notées lors d'un contrôle préliminaire des teneurs en SO_2 gazeux dans des régions rurales éloignées de l'est du Canada, mais elles ne sont que de très peu supérieures à celles souvent notées à Toronto (Barrie, L.A., Wiebe, H.A., Fellin, P. et Anlauf, K, S.E.A., Downsview, Ont., données non publiées, 1980). Il y a donc une nette possibilité de dommages par le SO_2 près des centres urbains et d'autres sources.

L'existence du transport à longue distance du SO_2 a aussi été démontrée (Barrie et al., 1980; McBean, 1980). Etant donné le manque de données de contrôle en région rurale pour des zones comme le sud de l'Ontario et du Québec et la probabilité de l'existence d'effets synergiques entre le SO_2 et d'autres polluants de l'air, il est donc logique d'attendre que plus de données soient disponibles avant de porter un jugement sur les effets du SO_2 sur le rendement des cultures.

On a tenté, lors d'un grand nombre d'études de laboratoire, de démontrer l'existence de dommages directs aux feuilles en simulant des pluies acides. Il est nécessaire de faire appel à des expositions prolongées du feuillage à des pH plus acides que ceux des pluies pour provoquer l'apparition de symptômes probants (Lee et al., 1980; Neumann, 1980). Les résultats obtenus aux pH des pluies naturelles ne sont pas concluants (Neumann, 1980; Evans et Curry, 1979).

Effets indirects: Les effets indirects du SO_2 sur les végétaux présentent une importance égale aux effets directs, si ce n'est plus grande à long terme. Ils attirent de plus en plus l'attention étant donné leur lenteur d'évolution et leur persistance. Linzon (1978) a signalé que les effets des précipitations acides portaient plus sur les sols que sur le feuillage. Les conséquences nuisibles de l'accroissement de l'acidité du sol sont variables. La croissance des végétaux est limitée de façon stricte à certains pH acides. Les sols ou les solutions à pH inférieur à 4,0 sont directement toxiques pour les racines des plantes. Les valeurs minimum de pH permettant une bonne croissance des cultures (Nyborg, 1975) varient de 6,2 pour la luzerne à 4,6 ou 5,0 pour les graminées; la plupart des cultures nécessitent un pH supérieur à 5,0. Le pH des eaux de pluie de l'est du Canada se situant souvent entre 4,0 et 5,0, il y a donc possibilité d'effets nocifs si les sols ne sont pas tamponnés de façon adéquate. Une acidité élevée du sol modifie toute la chimie des sols et influe donc de plusieurs façons sur la croissance des plantes. Selon l'espèce, les plantes peuvent être affectées par des teneurs toxiques en Al et Mn suite à l'augmentation de la solubilité de ces substances dans les sols acides. Nyborg (1975) a souligné que, suite à une importante augmentation de sa solubilité, l'aluminium pouvait devenir toxique à pH 5,5. La fixation symbiotique de l'azote est aussi sensible au pH (comm. pers., S. Mathur, I.R.C.B., Agriculture Canada), le développement des nodules et la fixation de l'azote étant retardés par un pH faible. Les pH acides sont, d'une façon générale, nuisibles au processus microbiologiques qui se déroule dans les sols.

L'absorption directe de SO_2 gazeux à partir de l'atmosphère est une menace pour les cultures et il devient de plus en plus apparent que l'acidification continue des sols par les

précipitations acides et d'autres sources, comme les fertilisants, aura des effets encore plus importants. Quant aux mesures correctives possibles, nous pouvons espérer limiter les effets des précipitations acides par la modification des pratiques agricoles comme la sélection de plantes plus tolérantes aux sols acides, la modification des programmes agricoles de façon à effectuer des cultures plus adaptées aux zones touchées et, plus directement, par le chaulage.

ii) Oxydes d'azote (NO, NO_2), nitrates de peroxyacyle (N.P.A.) et ozone

Les oxydes d'azote et leurs dérivés toxiques produits photochimiquement, ou par les procédés industriels ou la combustion, forment un autre groupe de polluants de l'atmosphère. Dans une certaine mesure, les oxydes d'azote posent les mêmes problèmes que le SO_2. Les effets nocifs des oxydes d'azote gazeux sur les plantes ne sont cependant pas les mêmes que ceux du SO_2 et les plantes présentent des sensibilités différentes à ces deux types de substances. Taylor (1979) a signalé que les oxydes d'azote présentaient un faible niveau de phytotoxicité. L'oxyde nitrique produit par la combustion peut cependant être oxydé dans l'atmosphère en dioxyde d'azote qui peut réagir photochimiquement avec des hydrocarbures pour produire de l'ozone et du nitrate de peroxyacyle (N.P.A.). L'ozone et le N.P.A. sont nocifs pour les végétaux en présence de pollution par hydrocarbures. On possède une bonne documentation sur les dommages par l'ozone (taches) dans certaines régions, mais on n'a pas démontré l'existence de dommages locaux étendus, au contraire des effets du SO_2.

Evaluation des effets actuels et éventuels de la pollution atmosphérique sur les cultures

Le problème des dommages aux cultures par la pollution au Canada doit être abordé en faisant appel à deux approches. L'une est l'évaluation des dommages actuels et possibles aux cultures. L'autre regroupe les mesures limitatives ou correctives qui pourraient être prises pour limiter ou éviter de tels dommages. Les mesures autres que la diminution des émissions seront fonction des résultats de l'évaluation des dommages.

La principale catégorie de dommages aux cultures est celle des dommages directs découlant de la pénétration dans les tissus végétaux de bioxyde de soufre, d'oxydes d'azote et, probablement, d'ozone sous forme gazeuse. Si l'on se base sur les données disponibles, les effets directs des précipitations acides à la surface des feuilles ne présentent pas un risque très important pour le moment. Les essais en laboratoire portant sur les précipitations acides simulées sur le feuillage ne sont pas

concluants et le pH des précipitations est rarement près de celui pour lequel on a noté des effets nocifs chez les plantes (S.E.A., 1977-79; Lee et al., 1980). Les effets indirects de l'acidification cumulative du sol pourraient bien dépasser en importance les dommages causés par les dépôts humides ou secs à la surface des végétaux (Neumann, 1980). Les effets de l'ozone gazeux produit par la réaction photochimique entre les oxydes d'azote et les hydrocarbures ne doivent pas être ignorés mais nous devons, en ce moment, mettre l'accent sur les effets du SO_2 et des oxydes d'azote gazeux et leur apport à l'acidification des eaux de pluie.

Les informations suivantes seront nécessaires à l'évaluation complète des effets de la pollution de l'air sur les cultures:

a) Collecte systématique de données sur l'intensité et la portée de la pollution, effectuée par surveillance ou échantillonnage réguliers de l'atmosphère dans les régions rurales exposées aux voies de transport des émissions industrielles ou de combustion. Cette surveillance devrait comprendre le dosage direct du SO_2 et des oxydes d'azote gazeux dans l'atmosphère et la mesure des taux d'absorption par les plants (vitesses de formation des dépôts à différents stades physiologiques.[1]

b) Données statistiques sur la distribution et la concentration des cultures importantes. La connaissance de la sensibilité relative de ces cultures au SO_2 gazeux pourra ensuite servir à calculer une estimation pondérée des effets possibles de la pollution de l'air sur l'économie agricole. Malvern et al. (1980) ont effectué une tentative préliminaire dans ce domaine pour l'Ontario. Ils ont utilisé l'expression "indice de sensibilité des cultures" pour décrire la valeur pondérée qu'ils ont calculée. Ils ont émis l'hypothèse que le report des données sur la distribution de la pollution par le SO_2 en Ontario sur la carte d'indice de sensibilité des cultures pourrait permettre d'estimer les risques de pollution dans cette province. On trouvera au tableau 3 certaines des sensibilités relatives des cultures obtenues d'après un tableau préparé par Malvern et al. (Ibid.).

La carte 2 a été préparée afin de montrer la distribution des cultures sensibles, pondérée par des facteurs reflétant les valeurs des cultures ainsi que le degré de spécialisation de besoins en sols et en climats de chaque type de culture (tableau 3). La carte indique la distribution de chacune des cultures présentées au tableau 3 en pourcentage de terres cultivées multiplié par le facteur approprié. Ceci permet de faire ressortir les cultures qui présentent la plus grande valeur ou dont les besoins en sols ou climats sont les plus spécifiques, ce qui rend plus difficile le déplacement de la

[1] Agriculture Canada et la province de l'Alberta ont amorcé certaines études en collaboration portant sur ces facteurs (comm. pers., Desjardins, I.R.T., Agriculture Canada, Ottawa).

TABLE 2 Superficie de chaque classe de sensibilité des terres de l'est du Canada.

	Total des terres agricoles*	Superficie sensible		Superficie modérément sensible		Superficie non sensible	
	hectares	hectares	%	hectares	%	hectares	%
Terre-Neuve	29 423	4 660	15,8	5 885	20,0	18 878	64.2
Nouvelle-Ecosse	400 249	16 290	4,1	72 008	18,0	311 951	77,9
Ile-du-Prince-Edouard	278 050	215 443	77,5	62 607	22,5	aucun	0
Nouveau-Brunswick	402 328	38 652	9,6	136 724	34,0	226 952	56,4
Québec	3 654 134	916 666	25,1	125 313	3,4	2 612 155	71,5
Ontario	5 966 816	561 728	9,4	1 012 734	17,0	4 392 354	73,6
Est du Canada	10 731 000	1 753 439	16,3	1 415 271	13,2	7 562 290	70,5

* Terres améliorées - Recensement agricole de 1976.

CARTE 2. SENSIBILITÉ DES CULTURES AGRICOLES À LA POLLUTION PAR SO_2† ET VALEURS MOYENNES ANNUELLES ESTIMATIVES DES DÉPÔTS ATMOSPHÉRIQUES (HUMIDES ET SECS) DE SOUFRE (1977-1979)* EST DU CANADA

Forte sensibilité (indice sans échelle, ≥ 0.60)

Sensibilité moyenne (indice de 0.40 à 0.59)

Faible sensibilité (indice de 0.20 à 0.39)

Très faible sensibilité (indice sans échelle, ≤ 0.20)

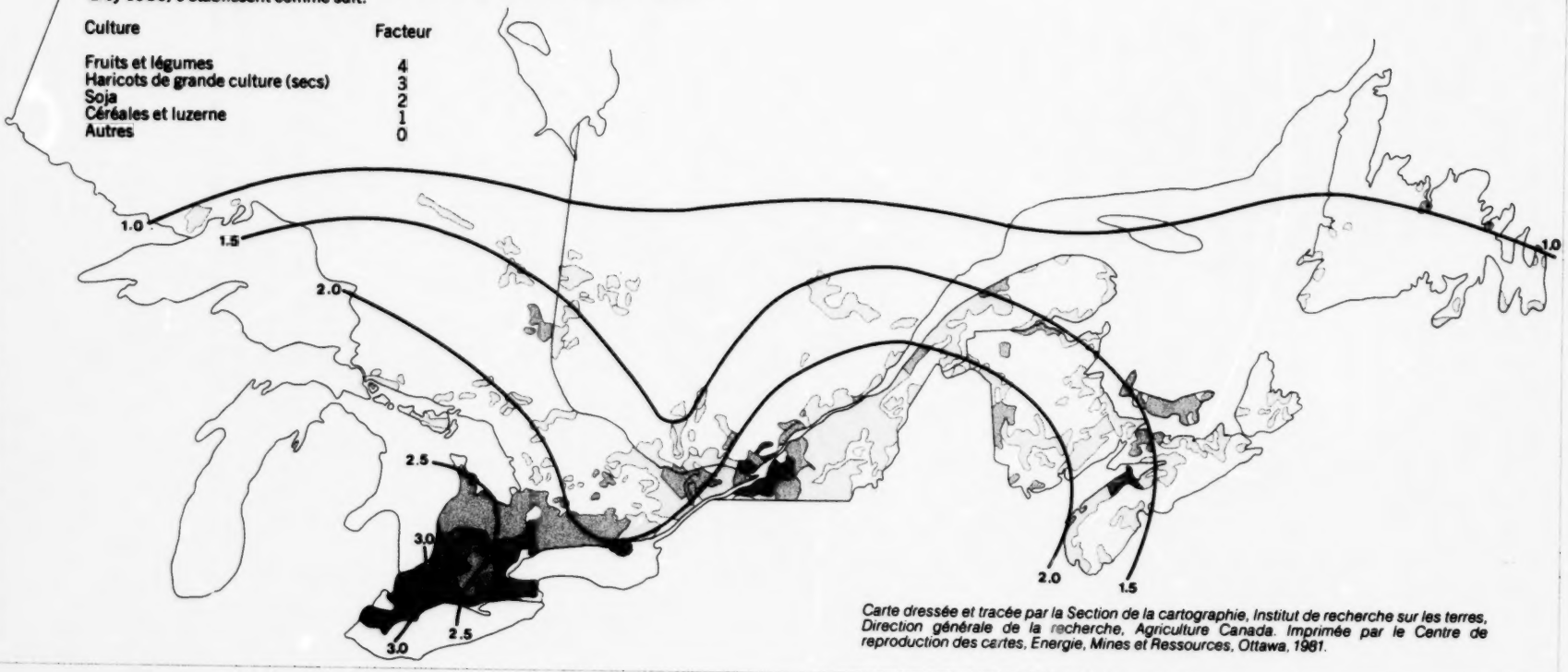
Non agricole

† Sensibilité des cultures estimée à l'échelle du comté à partir de la formule:

$$\text{Indice} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\text{surface de la culture } i}{\text{surface des terres agricoles}} \times \text{facteur de sensibilité } i \right)$$

dans lequel les surface sont tirées du Recensement de l'agriculture, 1976 (Statistique Canada) et les facteurs de sensibilité (tableau 3 et Malvern, Paterson et Grey 1980) s'établissent comme suit:

Culture	Facteur
Fruits et légumes	4
Haricots de grande culture (secs)	3
Soja	2
Céréales et luzerne	1
Autres	0



* Dépôt de soufre sous forme humide ($gSm^{-2}an^{-1}$) calculé à partir des données de CANSAP, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, 1977-1979. Dépôts sous forme sèche évalués à 40% des dépôts humides.

Les surfaces en culture ont été extrapolés de cartes au 1/50 000 par Claire Gosson, services de géographie, Direction des levés et de la cartographie, ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources, Ottawa.

* Nota: à cause de la généralisation associée à la mise en carte, certaines zones marquées comme agricoles peuvent renfermer des terres non agricoles.

Carte dressée et tracée par la Section de la cartographie, Institut de recherche sur les terres, Direction générale de la recherche, Agriculture Canada. Imprimée par le Centre de reproduction des cartes, Energie, Mines et Ressources, Ottawa, 1981.

production quand les dommages de la pollution atmosphérique deviennent trop importants. Il serait intéressant d'indiquer les concentrations de SO_2 gazeux en zones rurales sur la carte, mais nous ne disposons pas actuellement de ces données. Les valeurs estimées des dépôts du soufre total ont cependant été indiquées, mais celles-ci ne donnent qu'une indication grossière des régions qui seraient le plus probablement affectées par le SO_2 et ne sont donc pas une estimation du SO_2 en tant que tel.

c) Nous disposons de données reflétant les effets des précipitations acides sur le sol qui, à leur tour, ont un effet sur la viabilité et la croissance des plantes cultivées. La sensibilité des sols de diverses régions de l'est du Canada aux variations de pH causées par l'effet acidifiant des précipitations a fait l'objet d'une compilation, dont les résultats sont présentés à la carte 1, de même qu'une estimation du pouvoir acidifiant des précipitations pour les sols.

Tableau 3 Types de cultures sensibles*

Groupes de cultures	Valeur assignée
Fruits et légumes	4
Haricots blancs	3
Soja	2
Céréales et luzerne	1

* D'après Malvern et al. (1980). La classe assignée est fonction de la valeur économique et du degré de spécialisation quant au sol et au climat de chaque type de culture. Le tabac et le maïs sucré ont été exclus car ils ne sont sensibles qu'à l'ozone.

Effets des pluies acides sur les cultures

On dispose de très peu de données permettant de maintenir à jour un registre des teneurs en SO_2 de l'atmosphère. Un grand nombre de sources de soufre atmosphérique contribuent aux teneurs en soufre des précipitations acides (Fowler, 1978). On a démontré l'existence d'une corrélation entre les teneurs en SO_2 atmosphérique et celles en SO_2, HSO_3^- et SO_3^- dissoutes dans les eaux de pluies (Gravenhorst et al., 1978), mais on ne sait pas de façon certaine s'il existe une relation constante avec le SO_4 ou le S total des eaux de pluies. On ne peut donc pas utiliser le dépôt du SO_4 comme valeur de remplacement du SO_2 gazeux. Certaines études ont cependant indiqué une relation entre le SO_4 des précipitations et les émissions de SO_2 atmosphérique (Malvern et al., 1980; Acres Consultants, 1977) tandis que d'autres démontraient une relation entre le SO_2 atmosphérique et des sources d'émission tant distantes que

locales (McBean, 1980; Barrie et al., 1980). Il est donc raisonnable de prévoir que les régions qui présentent un dépôt atmosphérique à teneurs élevées en soufre total présenteront aussi des teneurs en SO_2 gazeux plus élevées que celles des régions dont les dépôts en S total sont plus faibles. De fait, la comparaison de données non publiées de Barrie, Wiebe, Fellin et Anlauf (S.E.A., Downsview, Ont., 1980) avec les teneurs en sulfate signalées par CANSAP permet de noter une assez bonne concordance quand les données urbaines de Toronto sont exclues. En l'absence de données plus précises, les teneurs en soufre du CANSAP nous fournissent une certaine indication des régions où les plantes pourraient souffrir de la pollution de l'air. La teneur en soufre d'échantillons de précipitatios prélevés dans le cadre du programme CANSAP est présentée exclusivement sous forme de SO_4. Il est nécessaire d'utiliser ces valeurs comme indicateurs provisoires des dépôts de soufre total car nous ne disposons pas d'autres données sur les dépôts secs dans l'est du Canada. On peut, en utilisant l'estimation de 40% de dépôts secs de Whelpdale et Galloway (1979), effectuer une première évaluation de la distribution des dépôts de soufre total sur les terres agricoles en utilisant la base de données du CANSAP. Cette distribution est présentée à la carte 2, mais elle ne peut être utilisée de façon quantitative.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Il est logique de supposer que les précipitations qui tombent à la surface de la terre ont toujours été quelque peu acides. L'importance de cette acidité était fonction de la présence de divers éléments dans l'atmosphère. Dans des conditions idéales, relativement rares, le pH de la pluie devrait être de 5,6. Cette valeur est basée sur la concentration moyenne de CO_2 de l'atmosphère. Les autres principaux constituants de l'atmosphère, le N_2 et le O_2, ne réagissent pas facilement avec l'eau de pluie sauf dans des circonstances particulières où le N_2 est transformé en oxydes d'azote.

La situation décrite plus haut n'a existé que rarement depuis l'apparition de l'homme. Les émissions de contaminants dans l'atmosphère se sont accrues de façon constante depuis le début de l'ère industrielle et ceux-ci nuisent de plus en plus à l'environnement naturel. L'azote et le soufre sont deux des éléments qui sont rejetés dans l'atmosphère sous diverses formes chimiques et qui sont responsables de l'accroissement de l'acidité des précipitations. Les polluants rejetés dans l'atmosphère retombent sur le sol sous forme de sédiments secs ou combinés à l'eau des précipitations. L'acidité des précipitations résulte de la présence d'acides, surtout H_2SO_4 mais aussi HNO_3 et HCl. Les ions d'ammonium (NH_4^+) sont aussi transformés en HNO_3 par le processus de la nitrification.

L'acidité de l'eau des précipitations est devenue un problème international étant donné les dommages causés à l'environnement aussi bien près que loin des sources des polluants responsables. Un bon exemple de ce phénomène est celui de la Suède, ou 77% du soufre atmosphérique provient de l'extérieur du pays. De même, les polluants émis dans la région industrielle du centre des Etats-Unis, en Ontario et au Québec sont transportés vers les provinces atlantiques. Les conséquences, au niveau du globe, des précipitations acides deviendront alarmantes si elles ne sont pas limitées. La production de polluants s'accroîtra en même temps que le niveau de vie des nations en voie de développement durant les prochaines années.

Le problème des précipitations acides touche l'agriculture car celles-ci ont pour effet certain d'accroître l'acidité des sols. Les sols formant un milieu dynamique complexe, la portée et l'importance des précipitations acides doivent être évaluées en fonction d'autres modifications qui se produisent dans les sols. L'hydrolyse des cations est une réaction acidifiante qui se produit continuellement dans les sols. Dans les sols des climats froids, où les processus de formation sont lents et où les réactions sont en harmonie avec le milieu naturel, la variation soudaine d'un paramètre aura très probablement un effet sur d'autres. Nos connaissances actuelles de la gestion et de la formation des sols nous portent à conclure que l'acidification de sols situés dans des environnements fragiles serait indésirable.

Dans le cas des sols en culture agricole, l'effet des précipitations acides doit être évalué en fonction de l'accroissement de leur acidité découlant de pratiques agricoles. Ainsi, les sols du sud-ouest de l'Ontario ont vu leurs teneurs en cations basiques diminuer de plus en plus avec le temps et certains d'entre eux, neutres il y a environ 50 ans, sont maintenant acides. Il a été noté à la station de recherche de Harrow que l'épandage continu de fertilisants azotés aux cultures de maïs avait abaissé le pH de certaines parcelles à 4,8 comparativement à un pH de 6,8 dans les parcelles témoins.

Les épandages de fertilisants commerciaux sur les sols agricoles se sont accrus de façon continue au niveau mondial et un bon nombre de ces fertilisants produisent dans les sols des réactions acides qui sont semblables à celles produites quand les eaux de pluie viennent en contact avec des polluants acidifiants comme le SO_x et le NO_x. L'évaluation des effets des précipitations acides sur les sols exige donc que l'on tienne compte du type de sol, de la situation géographique, des facteurs de formation des sols s'exerçant déjà, de la maturité des sols ainsi que de l'utilisation et des pratiques agricoles actuelles dans la région.

Les valeurs probables des apports acides atmosphériques aux sols de l'est du Canada sont de l'ordre de 20 à 40 meq ou micro-équivalents par 100 g de sol par an (humide et sec). Exprimé sous forme de chaux neutralisée, cela correspond à environ 20 à 40 kg de $CaCO_3$ par hectare par an. On peut logiquement conclure, en se basant sur les acidités actuelles des polluants présents dans les précipitations, que les modifications du pH provoquées par ce phénomène seront modérées pour les sols agricoles et de peu d'importance pour les sols où l'on effectue le chaulage. Le soufre, en plus de contribuer à l'acidité des précipitations, est aussi un élément nutritif majeur et la quantité apportée dans le sol à partir de l'atmosphère peut être utilisée par les plantes. Le soufre de source atmosphérique peut éviter d'avoir à effectuer des épandages de soufre dans le cas des sols où la minéralisation de la matière organique ou la désintégration normale des matériaux soufrés ne suffisent pas aux besoins en cette substance.

Les effets des polluants atmosphériques sur la végétation peuvent avoir pour cause un contact direct avec le SO_x et le NO_x rejetés ou un contact avec les précipitations acides ou encore résulter indirectement de l'effet des sols acides sur l'appareil radiculaire. Le SO_x gazeux semble présenter un effet plus important que les dépôts de surface et un bon nombre de cultures sont sensibles aux effets nocifs de la pollution de l'air s'exerçant de cette façon. Les quelques données disponibles pour les régions rurales portent à penser que les teneurs ambiantes en SO_2 sont bien en deçà de celles déterminées comme nocives pour la plupart des cultures. La quantité très restreinte de données et l'existence possible d'effets synergiques entre les polluants de l'air limitent beaucoup l'évaluation de la portée générale des effets actuels et futurs du SO_2 sur le rendement des cultures. Il faudra donc adopter une attitude prudente tant qu'on ne disposera pas de données plus complètes. Peu de faits appuient l'hypothèse d'effets directs significatifs des précipitations acides sur le feuillage des végétaux. On s'interroge cependant quant à la possibilité d'une diminution de la résistance du feuillage aux attaques par les champignons, les virus et les insectes. Ces craintes n'ont pas été vraiment justifiées, jusqu'à maintenant. Le type de végétation est un important élément à prendre en considération lorsque l'on traite de ces effets qui pourraient bien être fort différents pour des végétaux vivaces, comme ceux d'une forêt, et pour des plantes annuelles, comme des cultures.

On dispose de peu de renseignements sur les effets des polluants sur les cultures dans les conditions réelles. On a signalé, ces dernières années, les résultats de travaux effectués en laboratoire. Il apparaît particulièrement important, si l'on désire effectuer une bonne évaluation portant sur les cultures,

que des observations soient aussi faites dans les conditions réelles. La nature dynamique de l'environnement ne peut être étudiée de façon isolée. Les effets seront fonction de la durée de l'exposition, des vents, de la température et de l'état physiologique du couvert formé par les cultures (vitesses de dépôt) ainsi que de l'importance et du taux des précipitations, entre autres.

Un autre point relatif à l'acidification et à la sélection des cultures mérite d'être traité et pris en considération. L'acidité des sols agricoles les plus productifs s'accroît à l'échelle mondiale. Des variétés mises au point pour obtenir un rendement optimum à pH 6, par exemple, sont maintenant cultivées dans des sols dont le pH est tombé à 5. On peut se demander s'il sera possible d'obtenir des variétés dont le rendement sera maximum à pH 5.

Problèmes agricoles causés par les précipitations acides

1) Sols

Les précipitations acides ont un effet modéré sur les sols agricoles si on le compare à ceux des pratiques de fertilisation comme l'épandage d'engrais azotés. Nous devons cependant demeurer conscients du fait que le nombre et l'importance des rejets de polluants responsables de l'acidification pourraient s'accroître à l'avenir. Les agronomes devraient s'intéresser de près à l'augmentation de l'acidité totale (de toutes sources) dans les sols et aux modifications de l'environnement du sol. L'augmentation de l'acidité des sols peut, si elle n'est pas limitée et maintenue à un niveau acceptable, provoquer le passage en solution des minéraux de l'argile, la diminution de la capacité d'échange cationique, l'accroissement de la fixation des matières nutritives, la mise en liberté d'éléments toxiques, etc. La plupart des spécialistes des sols s'accordent pour dire que les pratiques agricoles utilisées pour la plupart des cultures se traduisent par une augmentation de l'acidité quand on ne fait pas aussi appel au chaulage.

On compte, parmi les points d'intérêt relatifs à l'acidité des sols:

- L'évaluation de la réaction (pH) actuelle de nos sols agricoles.
- L'évaluation du rôle des pratiques agricoles sur l'augmentation de l'acidité des sols.
- La détermination du pH du sol qui s'avérera le moins destructeur pour l'environnement sol-végétaux et qui maintiendra la saturation optimale en bases.

- L'évaluation de la nécessité d'un mécanisme protecteur pour maintenir l'acidité des sols à un certain niveau lors de la formulation de recommandations de fertilisants, comme l'utilisation simultanée de chaux pour neutraliser l'acidité découlant de l'épandage de fertilisants.

La carte 1, qui indique la sensibilité des sols agricoles de l'est du Canada et l'apport probable d'acidité atmosphérique aux sols, peut servir à l'identification des zones de forte sensibilité qui subissent des apports élevés. D'une façon générale, les apports importants correspondent à des zones où la sensibilité des sols est la moindre. Les exceptions à cette généralisation sont les sols sableux de la rive nord du Saint-Laurent, au Québec, et certaines zones de la région du Bouclier dans le centre-sud de l'Ontario. Il y a aussi les sols sableux modérément sensibles du sud-ouest de l'Ontario et de l'ouest du Nouveau-Brunswick qui correspondent aux zones de précipitations acides importantes. Des données non publiées ont été rassemblées par l'auteur principal* afin de montrer les distributions des épandages de fertilisants azotés et de chaux dans l'est du Canada. Il est intéressant de noter que la plupart des sols sensibles situés à l'est de la région de Kingston (Ontario) reçoivent, en moyenne, suffisamment de chaux pour éliminer l'acidité des fertilisants et des précipitations acides. Cela n'est cependant pas le cas dans le sud-ouest de l'Ontario où les sols sableux modérément sensibles de cette région continuent à être sensibles aux précipitations acides.

ii) Cultures

Nos connaissances des effets sur les cultures des conditions atmosphériques qui existent au moment des périodes de croissance sont limitées, tant sur le terrain qu'en laboratoire où les conditions sont contrôlées. Il est nécessaire, pour concevoir des expériences valables, d'avoir des données fiables pour estimer les effets de NO_x, de SO_x et de l'acidité des pluies. La connaissance de l'importance de la pollution totale pendant une certaine période, un an par exemple, est d'un intérêt assez limité. Il faudra effectuer une meilleure surveillance et mettre sur pied des programmes de recherche portant sur: les vitesses de dépôt des polluants gazeux et leurs modifications par les variations des conditions physiologiques du couvert végétal des cultures; les concentrations de gaz de l'air; le pH des eaux de pluie et sa variation en fonction du temps: les cycles de précipitations et la façon dont les concentrations de polluants varient en fonction des différentes étapes de la croissance des cultures. Certains programmes déjà en vigueur permettent d'obtenir ce type de données de surveillance. Les agronomes devraient utiliser ces données pour l'évaluation de l'influence

des polluants sur les cultures. Des observations sur le terrain devraient aussi être faites pendant la période de croissance de diverses cultures et les résultats obtenus être reliés aux conditions et composantes atmosphériques.

La carte 2 indique les distributions des sensibilités pondérées des cultures au SO_2 atmosphérique. On y note que les régions du sud-ouest de l'Ontario et du sud de Montréal présentent la densité la plus élevée de cultures sensibles, très spécialisées et de plus grande valeur. Ces deux régions sont aussi nettement celles où l'on note les dépôts de soufre les plus élevés et on peut donc supposer que ce sont celles où la probabilité de pollution par SO_2 atmosphérique est la plus élevée. Elles représentent donc les deux régions où les dommages directs aux cultures peuvent éventuellement être les plus importants.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Mme Lendvay-Zwickl et M. Leuty de l'Institut de recherche sur les terres pour nous avoir fourni des renseignements provenant du dossier SISCan. Nous voulons aussi remercier MM. Beke, Ph.D., MacDougall et Cossette du levé des sols du Canada ainsi que les laboratoires provinciaux d'analyse des sols de l'Ile-du-Prince-Edouard, de la Nouvelle-Ecosse, du Nouveau-Brunswick, du Québec et de l'Ontario qui nous ont fourni des résumés de leurs données sur le pH des sols de surface des terres agricoles. Nous terminons en remerciant M. John Ramsey et Mme Lucie Mongeon de l'Institut de recherche sur les terres de l'aide apportée lors de la préparation de la présente publication.

*Une évaluation de la dégradation des terres agricoles au Canada, D.R. Coote, J. Dumanski et J.F. Ramsey, Direction générale de la recherche, Agriculture Canada, Ottawa (manuscrit en préparation).

BIBLIOGRAPHIE

Acres Consultants, Atmospheric loading of the lower Great Lakes and the Great Lakes Drainage Basin, Pollution from Land Use Activities Reference Group, LJC, Windsor, Ont., 1977, 70 pp.

Bache, B.W., The acidification of soils, dans T.C. Hutchinson et M. Havas, compilateurs, Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems, Proc. NATO Adv. Res. Inst. Conf., Toronto, 1979, p. 183 à 202.

Barrie, L.A., Weibe, H.A., Anlauf, K. et Fellin, P., The Canadian air and precipitation monitoring network APN, dans Proc. 14th. Int. Colloqu. Paris, du 5 au 8 mai, M.M. Bernarie, compilateur, Studies in Environmental Science, Vol. 8, 1980, p. 355 à 360.

Bennett, J.H. et Hill, A.C., Interactions of air pollutants with canopies of vegetation, dand J.B. Mudd et T.T. Kozlowski, compilateurs, Responses of Plants to Air Pollution, Academic Press, 1975, p. 273 à 306.

Berry, R.L., The Canadian network for sampling precipitation (CANSAP) project, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview, Ont., 1979, 9 pp.

Brady, N.C., The nature and properties of soils, 9e édition, MacMillan, N.Y., 1974, Chap. 16.

Cameron, D.R., Neilsen, G.J., Culley, J.L.B., DeJong, R. et Findlay, W., Nitrogen movement in tile-drained clay and sandy agricultural watersheds, rapport final, Projet 13, Agricultural Watersheds Studies, PLUARG, IJC, Windsor, Ont., 1977, 97 pp.

Evans, L.S. et Curry, T.M., Differential responses of plant foliage to simulated acid rain, Am. J. Bot. 1979, 66:953-962.

Fowler, D., Wet and dry deposition of sulphur and nitrogen compounds from the atmosphere, dans T.C. Hutchinson et M. Havas, compilateurs, Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems, Proc. NATO Adv. Res. Inst. Conf. Toronto, Ont., 1978.

Gravenhorst, G., Beilke, S., Betz, M. et Georgii, H.-W., Sulphur dioxide absorbed in rain water, dans T.C. Hutchinson et M. Havas, compilateurs, Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems, Proc. NATO Adv. Res. Inst. Conf., Toronto, Ont. 1978.

Grennfelt, P., Bengston, C. et Skarby, L., An estimation of atmospheric input of acidifying substances to a forest ecosystem, dans T.C. Hutchinson et M. Havas, compilateurs, Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems, Proc. NATO Adv. Res. Inst. Conf. Toronto, Ont., 1978.

Katz, M. et Ledingham, G.A., (plusieurs articles dans) Effect of sulphur dioxyde on vegetation, Bull. 815, Conseil national de la recherche du Canada, Ottawa, 1939.

Lee, J.J., Needly, G.D. et Perrigan, S.C., Sulfuric acid rain effects on crop yields and foliar injury, rapport de l'Agence de protection de l'environnement, Etats-Unis, No. 600/3-80-016, 1980.

Linzon, S.N., Effects of air-borne sulphur pollutants on plants, dans J.O. Nriagu, compilateur, Sulphur in the environment, partie II, Ecological impacts, John Wiley and Sons, 1978, p. 109 à 162.

Malvern, R.J., Paterson, W.M. et Grey, G.D., An approach to mapping air pollution sensitive crops in Ontario, Ontario Hydro, 73rd Air Poll. Control Assoc. Annu. Meet., Montréal, 25 juin, 1980.

McBean, G.A., Long-range transport and deposition of acidic substances across national boundaries, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview, Ont., 73rd Air Pollut. Control Assoc. Annu. Meet. Montréal, du 22 au 27 juin, 1980.

McFee, W.W., Sensitivity of soil regions to long term acid precipitation, rapport de l'Agence de protection de l'environnement, Etats-Unis, no. 600/3-80-013, 1980.

Mudd, J.B. et Kozlowski, T.T., compilateurs, Responses of plants to air pollution, Academic Press, 1975.

Neumann, H.H., Meteorological conditions associated with air pollution injury to plants, dans Proc. A.E.S. Workshop on Agrometeorol.,université de Guelph, 1980.

Nriagu, J.O., compilateur, Sulphur in the environment, partie II, Ecological impacts, John Wiley and Sons, 1978.

Nyborg, N., Sulfur pollution and soil, dans J.O. Nriagu, compilateur, Sulfur in the environment, partie II, Ecological impacts, John Wiley and Sons, 1975, p. 359 à 390.

Nyborg, M. et Walker, D.R., An overview - the effects of sulphur dioxide emmission on the acidity and sulphur content of soils, dans H.S. Sandu et M. Nyborg, compilateurs, Proc. Alta. Sulphur Gas Research Workshop III, université d'Alberta, Edmonton, 1977, p. 165 à 195.

Overrein, L.N., Acid precipitation - impacts on the natural environment, dans H.S. Sandu et M. Nyborg, compilateurs, Proc. Alta. Sulphur Gas Research Workshop III, université d'Alberta, Edmonton, 1977, p. 1 à 6.

Pêcheries et Environnement Canada, Hydrologic Atlas of Canada, Approvisionnements et Services Canada, Ottawa, 1978.

Pender, G.F. et Jones, J.F., Determination of the groundwater component of peak discharges from the water chemistry of total runoff, Water Resources Res., 1969, 5(2):438-445.

Penney, D.C. et Henry, J.L., Reaction of fertilizer N with soil components, dans Proc. Western Canadian Nitrogen Symp., Alta. Soil Sci. Workshop, Calgary, 1976, p. 275 à 298.

Rennie, P.J., The susceptibility of eastern Canadian terrestrial ecosystems to long-range pollution, Service de foresterie, Environnement Canada, Ottawa, (non publié), 1979.

Rennie, P.J. et Halstead, R.L., The effects of sulfur on plants in Canada, dans Sulphur and its inorganic derivatives in the Canadian environment, Conseil national de la recherche du Canada, 1977, no. 15015, p. 69 à 179.

Russell, E.W., Soil conditions and plant growth, Longmans, London, 9e édition, 1961, Chap. 22.

Service de l'environnement atmosphérique, résumé des données du CANSAP, Environnement Canada, Downsview, Ont., publication trimestrielle, 1977 à 1979.

Taylor, O.C., Phytotoxic air pollutants and their sources, Symp. on the Effects of Airborne Pollution on Vegetation; E.C.E., Warsaw, Poland, 1979.

Wang, C. et Coote, D.R., Classes de sensibilité des terres agricoles à l'action prolongée des précipitations acides dans l'est du Canada, Direction générale de la recherche, Canada, 1981. 9 pp.

Whelpdale, D.M., Regional-scale measurements of precipitation, composition and deposition, Paper Pres. at W.M.O. meeting Boulder, Colorado, U.S., du 20 au 24 août, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview, Ont., 1977.

Whelpdale, D.M. et Galloway, J.N., An atmospheric sulphur budget for North America, Sofia, Bulgarie, du 1er au 4 octobre, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview, Ont., 1979.

Whitely, H.R. et Ghate, S.R., Hydrologic Model Project, rapport final, projet 15, Agricultural Watershed Studies, PLUARG, IJC, Windsor, Ont., 1978, 100 pp.